



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DIRECCIONAL DE UN VEHICULO TODOTERRENO

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA

AUTORA: IRENE FERMOSELL RUBIO

TUTOR: PROF. DR. DANIEL GARCÍA-POZUELO RAMOS

LEGANÉS, 2014

PROYECTO FIN DE CARRERA

*“Estudio del comportamiento direccional de un
vehículo todoterreno”*

Autora: Irene Fermosell Rubio

Tutor: Prof. Dr. Daniel García-Pozuelo Ramos

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	5
2	ESTADO DEL ARTE	7
2.1	INTRODUCCIÓN	7
2.1.1	DEFINICIÓN DE VEHÍCULO AUTOMÓVIL	7
2.1.2	NOCIONES CONSTRUCTIVAS BÁSICAS DEL AUTOMÓVIL	8
2.2	DINÁMICA VEHICULAR	10
2.2.1	AERODINÁMICA DEL AUTOMÓVIL	10
2.3	DINAMICA LONGITUDINAL	12
2.3.1	RESISTENCIA AL MOVIMIENTO	12
2.3.2	TRACCIÓN	13
2.3.2.1	Esfuerzo tractor máximo limitado por la adherencia	13
2.3.2.2	Esfuerzo tractor máximo limitado por el motor	13
2.3.3	FRENADO	14
2.3.3.1	Condiciones impuestas por la adherencia	16
2.4	DINAMICA LATERAL	17
2.4.1	CIRCULACIÓN EN CURVA	17
2.4.2	COMPORTAMIENTO DIRECCIONAL DEL VEHÍCULO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO	20
2.4.2.1	Coeficiente de viraje (K_v)	21
2.4.2.2	Respuesta direccional	23
2.4.3	SISTEMA DE DIRECCIÓN	24
2.5	DINAMICA VERTICAL	29

3 EL NEUMATICO Y SU INTERACCION CON LA CALZADA **32**

3.1	PROPIEDADES DE LOS NEUMÁTICOS	33
3.2	ESTRUCTURA DE LOS NEUMÁTICOS	34
3.3	TIPOS DE NEUMÁTICOS	36
3.4	ANALISIS DINAMICO DEL NEUMATICO	37
3.4.1	RIGIDEZ RADIAL (K_z)	38
3.4.2	COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (F_R)	39
3.4.3	TRACCIÓN Y FRENADO	40
3.4.4	ESFUERZOS TRANSVERSALES SOBRE EL NEUMÁTICO: DERIVA	42
3.4.5	MOMENTO AUTOALINEANTE	45

4 MATERIALES Y METODOS **47**

4.1	SOFTWARE DE SIMULACION: CARSIM®	48
4.1.1	FORMA DE TRABAJAR CON CARSIM®	49
4.2	VEHICULO DE ENSAYO Y NEUMÁTICOS	54

5 ANALISIS Y RESULTADOS **56**

5.1	DATOS PRELIMINALES	56
5.2	ENSAYO A RADIO CONSTANTE	60
5.2.1	PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	60
5.2.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	62
5.3	ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE	71
5.3.1	PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	71
5.3.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	72

5.4	ENSAYO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN CONSTANTE	88
5.4.1	PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	89
5.4.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	89

<u>6</u>	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>94</u>
-----------------	----------------------------	------------------

<u>7</u>	<u>DESARROLLOS FUTUROS</u>	<u>97</u>
-----------------	-----------------------------------	------------------

<u>8</u>	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>99</u>
-----------------	----------------------------	------------------

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Distribución de los elementos constructivos de un vehículo automóvil.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2: Flujos de aire en torno a un vehículo en movimiento</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3: Variación del C_x con la inclinación de la trasera del automóvil.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4: Fuerzas que se oponen al movimiento de un vehículo.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5: Curva ideal de par motor frente a potencia.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6: Solicitaciones que actúan sobre un vehículo en el proceso de frenado</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7: Fuerzas que actúan sobre un vehículo circulando en curva.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8: Modelo lineal para el cálculo de K_v</i>	<i>21</i>
<i>Figura 9: Respuesta direccional de vehículos subviradores, neutros y sobreviradores.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 10: Angulo de Avance.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11: Angulo de Salida.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12: Angulo de Caída</i>	<i>26</i>
<i>Figura 13: Angulo Comprendido.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14: Convergencia y Divergencia de las ruedas.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15: Ejemplos de elementos elásticos.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 16: Esquema de un amortiguador de fricción</i>	<i>30</i>
<i>Figura 17: Comportamiento de una suspensión de eje rígido e independiente</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18: Partes componentes de un neumático.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19: Tipos básicos de estructura en los neumáticos</i>	<i>36</i>
<i>Figura 20: Sistema de referencia SAE para el neumático.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 21: Distribución de presiones en la huella del neumático</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22: Variación de la rigidez radial con la presión de inflado dependiendo del tipo de neumático.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 23: Variación de μ_{xt} frente al deslizamiento</i>	<i>41</i>
<i>Figura 24: Deformada del neumático bajo la acción de fuerzas laterales.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 25: Deformación y deslizamiento lateral en la huella de contacto neumático -suelo</i>	<i>43</i>
<i>Figura 26: Angulo de deriva en un neumático</i>	<i>45</i>
<i>Figura 27: Variación del Momento Autoalineante dependiendo del esfuerzo aplicado</i>	<i>46</i>
<i>Figura 28: Módulos del software CarSim®</i>	<i>47</i>
<i>Figura 29: Pantalla de control general de CarSim®</i>	<i>49</i>
<i>Figura 30: Detalle del tercio izquierdo de la pantalla de control general.</i>	<i>50</i>

<i>Figura 31: Esquema de funcionamiento de CarSim®</i>	<i>51</i>
<i>Figura 32: Detalle del tercio central de la pantalla de control general.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 33: Detalle del tercio derecho de la pantalla de control general.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 34: Esquema del vehículo Nissan Pathfinder</i>	<i>54</i>
<i>Figura 35: Comparativa del vehículo real, esquematisa y utilizado por CarSim®</i>	<i>56</i>
<i>Figura 36: datos de las dimensiones del vehículo y su peso.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 37: Datos de vía del vehículo introducidos.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 38: Datos del área frontal y batalla introducidos</i>	<i>58</i>
<i>Figura 39: Datos del radio baja carga introducido.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 40: Definición de la trayectoria de la curva ensayada.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 41: Introducción de datos propios del ensayo.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 42: Aceleración lateral para radio de 200m y velocidad de 50km/h</i>	<i>63</i>
<i>Figura 43: Ángulo de dirección para radio de 200m y velocidad de 50km/h.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 44: Aceleración lateral y ángulo de dirección, para velocidad 130km/h, grado divergencia 0º y radio de curvatura 200m.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 45: Grafica ensayo radio constante 100m</i>	<i>67</i>
<i>Figura 46: Grafica ensayo radio constante 100m (modificación 1)</i>	<i>68</i>
<i>Figura 47: Grafica ensayo radio constante 200m</i>	<i>69</i>
<i>Figura 48: Introducción de datos propios del ensayo de velocidad constante.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 49: Aceleración lateral para ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de 1,5º/s</i>	<i>73</i>
<i>Figura 50: Ángulo de dirección para ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de 1,5º/s.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 51: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º/s ...</i>	<i>80</i>
<i>Figura 52: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º/s ...</i>	<i>80</i>
<i>Figura 53: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º/s ...</i>	<i>81</i>
<i>Figura 54: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º/s ...</i>	<i>81</i>
<i>Figura 55: Ensayo velocidad constante 110km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º/s .</i>	<i>82</i>
<i>Figura 56: Ensayo velocidad constante 130km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º/s .</i>	<i>82</i>
<i>Figura 57: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 10º/s</i>	<i>84</i>
<i>Figura 58: Ensayo velocidad constante 50km/h e incremento de ángulo de dirección 10º/s</i>	<i>84</i>
<i>Figura 59: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 10º/s</i>	<i>85</i>
<i>Figura 60: Ensayo velocidad constante 90km/h e incremento de ángulo de dirección 10º/s</i>	<i>85</i>
<i>Figura 61: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 10º/s</i>	<i>86</i>

<i>Figura 62: Ensayo ángulo de dirección constante 30°</i>	91
<i>Figura 63: Ensayo ángulo de dirección constante 100°</i>	91
<i>Figura 64: Ensayo ángulo de dirección constante 180°</i>	92

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Comparativa de matriculaciones de turismo y todoterreno del año 2000 y 2010.....</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 2: Distintos ángulos de convergencia utilizados en las simulaciones.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 3: Valores del Coeficiente de Adherencia en Deslizamiento dependiendo del tipo de terreno y las condiciones del mismo</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4: Ficha técnica del vehículo.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 5: Simulaciones realizadas para ensayo de radio constante.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 6: Ensayo de radio constante, con R=100.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 7: Ensayo de radio constante, con R=200.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 8: Simulaciones realizadas para ensayo de velocidad constante.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 9: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 10: Ensayo velocidad constante 50km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 11: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 12: Ensayo velocidad constante 90km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 13: Ensayo velocidad constante 110km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 14: Ensayo velocidad constante 130km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5º.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 15: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 10º.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 16: Ensayo velocidad constante 50km/h e incremento de ángulo de dirección 10º.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 17: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 10º.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 18: Ensayo velocidad constante 90km/h e incremento de ángulo de dirección 10º.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 19: Ensayo velocidad constante 110km/h e incremento de ángulo de dirección 10º.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 20: Tabla: Simulaciones realizadas para ensayo de dirección constante.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 21: Ensayo ángulo de dirección constante 30º</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 22: Ensayo ángulo de dirección constante 100º</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 23: Ensayo ángulo de dirección constante 180º</i>	<i>90</i>



1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mundo vive una constante revolución tecnológica que se puede apreciar en muchos aspectos que nos rodean.

Un aspecto fundamental y en el que se puede ver reflejado toda esta innovación tecnológica, son los automóviles.

Los automóviles, como hoy en día se conocen, han pasado de ser un bien escaso y que tan sólo una parte de la población tenía la suerte de disponer, a ser una herramienta de trabajo y la forma de obtener un acceso más fácil al ocio.

Cada día es más común apreciar como esta innovación tecnológica, se centra en la mejora del diseño, la fabricación y mantenimiento de los antiguos sistemas mecánicos dando paso a los novedosos sistemas electrónicos. El diseño de vehículos cada vez más potentes y con mejores prestaciones, obligan a los ingenieros de las distintas marcas automovilísticas, a realizar multitud de análisis y de ensayos para ver, de una primera manera más sencilla, económica y segura, como ha de responder el automóvil con la incorporación del nuevo sistema.

No obstante, la evolución no sólo se centra en el diseño e implantación de nuevos sistemas, sino que siempre se intentan mejorar los ya existentes como puede ser una mejora en la aerodinámica vehicular exterior, la incorporación de mejoras en los sistemas de suspensión o la gran evolución que han sufrido los neumáticos con la consiguiente ayuda tanto al control, como la amortiguación de nuestro vehículo a la hora de la conducción.

Todas ellas con un único fin, hacer de los automóviles unos instrumentos adaptados al ser humano cada día más fiables, manejables y seguros.

Pero hacer de los automóviles, utensilios fiables, manejables y sobre todo seguros, no es tarea sencilla, ya que la conducción no solo depende de los factores que interfieren directamente sobre la mecánica vehicular, sino que también interfieren otros factores externos que mayoritariamente



depende de la capacidad del ser humano y de las condiciones exteriores de la calzada donde se desarrolle el manejo del vehículo.

Si uno se acerca ya al objetivo principal de este escrito, se verá que todos los sistemas de los que está compuesto el automóvil son de vital importancia, pero en concreto, el sistema de dirección será el sistema que centrará la atención en la mayor parte del estudio.

Este sistema ayuda a dirigir al vehículo en la dirección que se desee para así elegir la trayectoria correcta y dará una mayor estabilidad frente a perturbaciones externas.

El conductor actúa de forma sencilla, modificando unos parámetros y adaptándolos a la marcha. Los parámetros de los que estamos hablando son el giro de las ruedas directrices respecto a los ejes perpendiculares a la superficie de rodadura.

El comportamiento del vehículo no obstante, quedará afectado por circunstancias externas como son:

- el ángulo y la velocidad con la que incide el viento.
- radio de curvatura de la calzada.
- las posibles irregularidades de la calzada (baches, badenes, socavones, etc.)

Los dos primeros incidentes no son constantes, solo se darán; el primero cuando nos afecte el viento y el segundo al circular en curva.

Pero el tercer factor, una vez que afecta al sistema direccional y en concreto a los ángulos de convergencia que vienen definidos por el fabricante, hará que este ángulo quede desajustado de forma constante. Estas pequeñas perturbaciones del firme, harán que el vehículo actúe de manera muy diferente a lo esperado, pudiendo pasar de un comportamiento subvirador o neutro a sobrevirador, con la inseguridad que esto conlleva.

Hoy en día, en el mercado del automovilismo, hay una gran variedad de marcas y de modelos pudiendo pasar de coches biplaza de muy pequeña cilindrada, indicados para la circulación en ciudad y de pequeñas distancias, hasta coches de tipo todoterreno con hasta 7 plazas y aptos para la conducción extrema en carreteras no asfaltadas y del medio rural.

Sin embargo, este tipo de vehículo llamado de forma generalista SUV (Sport Utility Vehicle, vehículo utilitario deportivo), han tenido una gran acogida en el mercado actual, y ya no sólo se utilizan en condiciones extremas en el campo o terrenos no acondicionados, sino que han pasado a ser una elección de vehículo para las familias que necesitan un automóvil con gran



capacidad tanto de plazas como de maletero, y no necesariamente, requieren un uso en condiciones extremas.

Por ello, todas las marcas en la actualidad, han visto una gran oportunidad de mercado y han lanzado su propia versión del SUV.

En la siguiente tabla se puede observar la matriculación de vehículos turismo y todoterrenos durante los años 2000 y 2010. No se datan los últimos años debido a la gran caída general del sector debido a la crisis y por tanto, los datos dejan de ser representativos.

MATRICULACIÓN DE VEHÍCULOS TURISMO Y TODOTERRENO				
	TURISMO		TODOTERRENO	
	Ventas total turismo	Porcentaje del total turismo	Ventas total todoterreno	Porcentaje del total todoterreno
Año 2000	1.381.369	94%	88.007	6%
Año 2010	873.322	88%	108.693	12%

Tabla 1: Comparativa de matriculaciones de turismo y todoterreno del año 2000 y 2010.

Como se puede observar en la tabla anterior, la evolución en la matriculación de vehículos todoterrenos se ha duplicado desde el año 2000 hasta el año 2010, por lo que estas cifras avalan la importancia que cada año van adquiriendo la venta en computo total de los vehículos de tipo SUV.

Una de las principales características que hacen diferente los vehículos tipo SUV de los utilitarios, es su gran peso (prácticamente el doble que los utilitarios). Por lo que es imprescindible dotarlos de motores de mayor cilindrada y potencia para que puedan mover la masa y además, hacer que éstos consigan alcanzar altas velocidades y sean útiles en la conducción ordinaria.

Otra característica que viene diferenciando a los vehículos tipo SUV es el ángulo de convergencia con el que vienen dotados de fábrica; es bastante mayor que el ángulo con el que salen



de fábrica los turismos. El dato característico de convergencia de los turismos varía entre 0 y 0,3, mientras que el ángulo de un todoterreno, puede variar en un espectro del 0,2 hasta 1.

Esta diferencia viene dada por la gran aceleración que sufren los neumáticos de un vehículo todoterreno para contrarrestar el peso y conseguir la velocidad deseada, haciendo que el ángulo de convergencia varié desde el inicial hasta prácticamente conseguir y transformarlo en neutro (0°). Por lo que realizar estudios con ángulos tanto de 0 como mayores como pueden ser 2 o incluso 4° , puede adquirir gran interés.

Por todo lo que se ha visto hasta ahora como el gran incremento en la venta de este tipo de vehículos, su gran diferencia de peso y sobre todo, por la diferencia de ángulo de convergencia con el que salen de fábrica respecto a un vehículo utilitario, se ha pensado en la posibilidad de realizar un estudio del comportamiento direccional de este tipo de vehículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: [WWWANF] y [WWWANI]



1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es realizar unas series de simulaciones con el fin de ver el comportamiento de un vehículo de tipo SUV en unas circunstancias predefinidas, que se dan en la vida real.

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, se centrará la atención en el sistema de dirección, realizando pruebas de circulación en curva con un vehículo todo terreno (en concreto un Nissan Pathfinder, cuyas características y especificaciones se verán más tarde).

En el mencionado estudio, el ángulo de convergencia tendrá variaciones de 0, 2 y 4° con el fin de obtener resultados del comportamiento que puede llegar a tener un vehículo todoterreno, desde un ángulo de valor similar al dotado en la salida de fábrica hasta otros cercanos, pero con un resultado muy diferente.

Asimismo, los ensayos van a ser llevados a cabo bajo tres circunstancias diferentes de curvatura:

- Circulación en curva a radio constante.
- Circulación en curva a velocidad constante.
- Circulación en curva a ángulo de dirección constante.

Y a su vez, se irá variando las velocidades en cada uno de ellos para ver el resultado que se obtiene pasando de velocidades bajas (30 km/h) hasta llegar a altas velocidades (130 km/h) con intervalos de 20 km/h.

En la siguiente tabla se puede apreciar un resumen de todos los ensayos que se van a llevar a cabo para analizar el comportamiento direccional en las situaciones arriba descritas.



RESUMEN DE ENSAYOS REALIZADOS			
<i>Radio= cte.</i>	convergencia 0 ° convergencia 2 ° convergencia 4 °	velocidades	30 km/h 50 km/h 70 km/h 90 km/h 110 km/h 130 km/h
<i>Velocidad = cte.</i>	convergencia 0 ° convergencia 2 ° convergencia 4 °	velocidades	30 km/h 50 km/h 70 km/h 90 km/h 110 km/h 130 km/h
<i>Angulo dirección =cte.</i>	convergencia 0 ° convergencia 2 ° convergencia 4 °	velocidades	30 km/h 50 km/h 70 km/h 90 km/h 110 km/h 130 km/h

Tabla 2: Distintos ángulos de convergencia utilizados en las simulaciones

Por lo que si se quiere hacer un resumen claro y conciso de los objetivos buscados se pueden listar a continuación:

- Evaluación del comportamiento virador de un vehículo todoterreno.
- Comprobación del ángulo de convergencia más satisfactorio para cada uno de los ensayos de caracterización.
- Obtención del ángulo de convergencia más adecuado para el vehículo analizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: [APA95] y [MPI06]



2 ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el automóvil a pasado a ser: el principal medio de transporte, un producto industrial altamente relacionado con el desarrollo de las sociedades y el instrumento más importante para satisfacer los deseos de movilidad, autonomía y, en ciertos aspectos, de libertad del hombre actual.

En el presente capítulo se pretende hacer una síntesis a cerca de los principales conceptos referentes a los vehículos automóviles. Con ello se intenta ilustrar de forma general el funcionamiento y características de los mismos.

Se centrará el estudio en cuatro aspectos de suma importancia para el análisis que se ha realizado, estos son: la dinámica vehicular (longitudinal, lateral, vertical y aerodinámica), las características constructivas y comportamiento de los neumáticos, la suspensión del vehículo y el sistema de la dirección.

2.1.1 Definición de vehículo automóvil

La Ley de Seguridad Vial da la siguiente definición de automóvil; “*vehículo de motor que sirve normalmente para el transporte de personas o cosas, o de ambas a la vez, o para la tracción de otros vehículos con igual fin*”.

Pero además de esta definición, un vehículo automóvil es una máquina que reúne las siguientes características:

- Como ya se ha dicho antes, debe tener la capacidad de transportar personas o cosas de un lugar a otro

- Debe estar dotado de al menos, cuatro ruedas neumáticas; propulsión mecánica, y sistemas capaces de orientar su trayectoria y regular su velocidad llegando a detenerlo si es necesario.

- Debe desplazarse de forma autónoma.

- Está concebido para moverse por superficies preparadas sin tener que seguir trayectorias fijas.

Es también interesante diferenciar entre vehículos rígidos y articulados y turismos y vehículos industriales.

2.1.2 Nociones constructivas básicas del automóvil

El automóvil está constituido principalmente por dos partes: El chasis, que es el armazón o conjunto mecánico del vehículo, y la carrocería, destinada a transportar a los pasajeros o la carga.

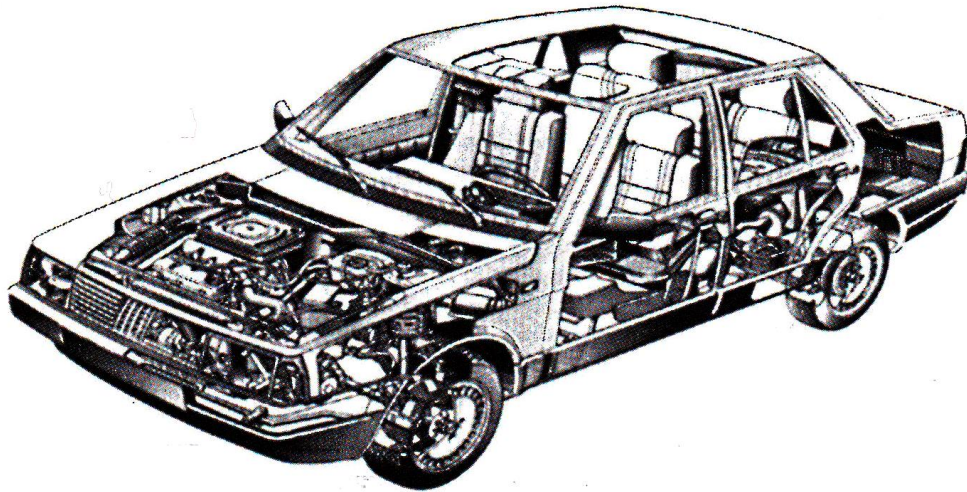


Figura 1: Distribución de los elementos constructivos de un vehículo automóvil.

El chasis de cualquier automóvil se compone de los siguientes elementos:

-El Bastidor: formado por largueros o travesaños, al que se fijan:

- **El Motor:** es un conjunto de piezas que están preparadas para transformar la energía química del combustible empleado, mediante un ciclo térmico de trabajo, en energía mecánica que proporciona movimiento rotativo a su eje.
- **La Transmisión:** encargada de llevar el movimiento rotativo de la salida del motor a las ruedas. Sus elementos más reseñables son: **Embrague** (su misión es interrumpir el flujo de potencia desde el motor a las ruedas.) y **Caja de Cambios** (cuya misión es adecuar el par y la velocidad a las condiciones de rodadura.) colocadas a continuación del motor, **Árbol de Transmisión** y **Diferencial** (Permite girar más rápido a la rueda de fuera que a la de dentro en los virajes).
- **La Dirección:** Se ocupa de transformar el movimiento rotativo del volante en movimientos de giro de las ruedas sobre su eje, además evita que las perturbaciones que el firme transmite a las ruedas lleguen al volante.



- **Los Frenos:** que pueden estar constituidos por unas zapatas que actúan sobre un tambor, o por una pinza que actúa sobre un disco.

-**Los Ejes de las Ruedas** delanteras y traseras.

-**La Suspensión** que une los ejes al bastidor y de la cual se enunciarán sus funciones más adelante. Puede estar formada por muelles helicoidales, ballestas, barras de torsión, elementos neumáticos o hidroneumáticos y amortiguadores.

-**El Sistema Eléctrico** que se ocupa de todos los dispositivos del automóvil que deben ser controlados electrónicamente. En la actualidad cada vez se introducen en los vehículos más dispositivos que necesitan de estos controles.

2.2 DINÁMICA VEHICULAR

2.2.1 Aerodinámica del automóvil

La Aerodinámica Vehicular tiene como objeto el estudio del conjunto de acciones y efectos que ejerce el aire sobre el vehículo en movimiento, así como la forma de lograr que estos sean lo más favorables posible.

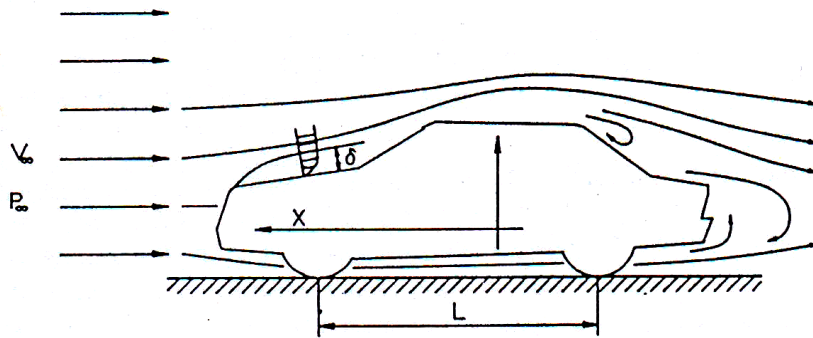


Figura 2: Flujos de aire en torno a un vehículo en movimiento

A la hora de diseñar un vehículo es fundamental tener en cuenta tanto el coeficiente aerodinámico C_x (coeficiente adimensional que viene predeterminado por ensayos experimentales basándose en la forma de la carrocería), como la superficie frontal de contacto con el fluido. Ya que con el producto de ambos factores, se puede obtener fuerza de resistencia aerodinámica.

La variación del coeficiente de resistencia al avance C_x se puede lograrla mediante un adecuado diseño del automóvil; con una disminución de la altura del morro o un suavizado de la forma del capot, podemos lograr que el C_x sea menor.

El diseño de la parte trasera también ejerce una fuerte influencia. Al variar la pendiente de la misma, el C_x oscila entre valores de entre 0.34 y 0.44, obteniéndose el valor mínimo para un ángulo de 10° (ver figura 3).

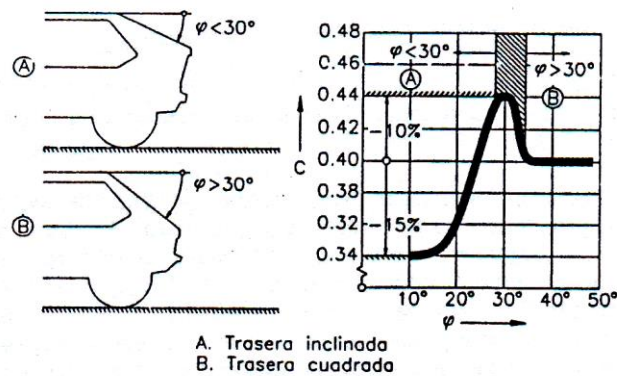


Figura 3: Variación del C_x con la inclinación de la trasera del automóvil

Este fenómeno de variación del C_x con la geometría del vehículo es debido al desprendimiento de la capa límite. Cuando esto ocurre se forman turbulencias que incrementan mucho dicho coeficiente. Sin embargo es imposible evitar que ésta se desprenda, por tanto debe buscarse que tal desprendimiento se produzca lo más atrás posible del vehículo, con el fin de obtener el menor C_x posible.

Un vehículo con un bajo coeficiente aerodinámico ayudará a aprovechar la potencia que desarrolla, una mayor estabilidad a altas velocidades y en un mejor confort en los pasajeros al disminuir los ruidos del interior del habitáculo.

2.3 DINAMICA LONGITUDINAL

La dinámica longitudinal del vehículo abarca el comportamiento del mismo en ausencia de aceleración lateral o cuando esta toma valores muy pequeños de magnitud despreciable, además se ignora toda acción que provoque asimetrías respecto al plano longitudinal del vehículo. Por tanto se pretende analizar el comportamiento del mismo cuando este circula en recta o en curvas de radio muy grande.

Se tratará el tema de la tracción y los límites que imponen tanto el motor como la adherencia a la misma. También se hará un análisis de los procesos de frenado y los factores que influyen sobre éstos.

2.3.1 Resistencia al movimiento

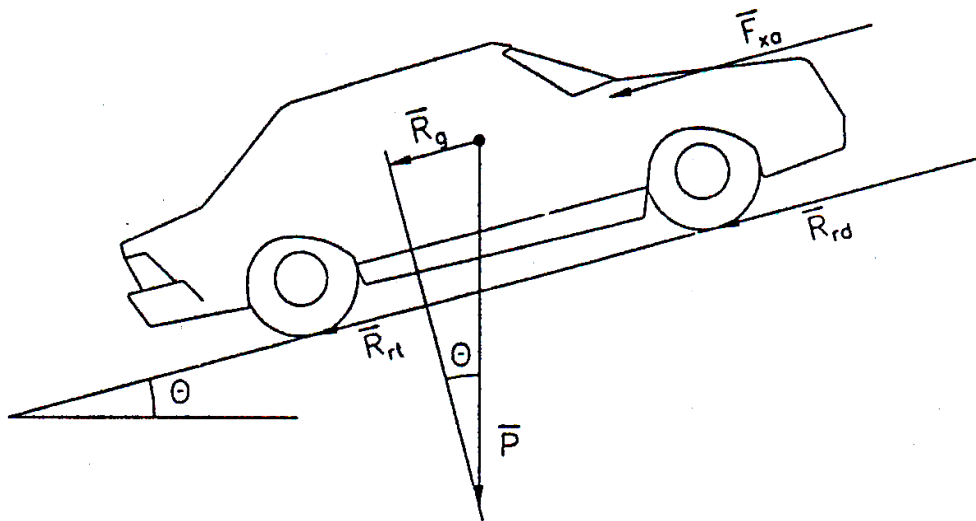


Figura 4: Fuerzas que se oponen al movimiento de un vehículo

Cuando un vehículo circula en línea recta está sometido a una serie de esfuerzos que se oponen a su movimiento, éstos son: la **resistencia aerodinámica al avance** (F_{xa}) que se trató en el tema anterior, la **resistencia a la rodadura** debida al rozamiento rueda-suelo y que, por tanto, tiene dos partes, la resistencia en el eje delantero (R_{rd}) y la del trasero (R_{rt}) y por último, en caso de circular sobre terreno inclinado, la **resistencia gravitatoria** debida al peso del vehículo (R_g). Esto se ilustra claramente en la figura 4.



2.3.2 Tracción

El momento tractor máximo que puede realizar un vehículo viene determinado por dos factores, la adherencia del neumático con la superficie de rodadura y el par máximo que puede desarrollar el motor. El límite suele venir determinado por la adherencia en condiciones de fuertes aceleraciones, las cuales se producen a velocidades bajas, especialmente en el arranque, si no se dan estas condiciones, es decir para altas velocidades, el límite vendrá impuesto por el motor. De éste límite y por tanto de por qué venga impuesto dependerán las prestaciones del vehículo.

2.3.2.1 Esfuerzo tractor máximo limitado por la adherencia

El deslizamiento longitudinal, es un parámetro importante en la generación de esfuerzos longitudinales en la superficie neumático-calzada.

El coeficiente de esfuerzo de tracción puede variar entre unos valores de 0 y $\mu_{\text{máx}}$. Este último coeficiente, corresponde al valor máximo de la adherencia entre el neumático y la superficie de rodadura, el cual depende de una serie de factores que se enumeran a continuación:

- Factores internos: velocidad de la marcha, dibujo de la banda de rodamiento y carga normal sobre la rueda
- Factores externos: humedad en la superficie, estado de limpieza y naturaleza de la calzada.

Una vez que se ha superado este límite, el deslizamiento entre neumático y calzada, se extiende de forma inmediata por toda la superficie de contacto y disminuye hasta un valor μ_d (coeficiente de adherencia en deslizamiento)

2.3.2.2 Esfuerzo tractor máximo limitado por el motor

Las condiciones operativas de los vehículos reclaman pares tractores elevados a bajas velocidades y reducidos a velocidades altas. Si esto se representa en unos ejes coordenados (ver siguiente figura 5) la curva que se obtiene es una hipérbola, la cual podría obtenerse para un motor que funcionara a potencia constante para todo el intervalo de velocidades. En el caso de los motores de combustión interna, que son los que usan los automóviles en la actualidad, es imposible lograr esto, por lo que se hace necesario un sistema que sea capaz de adecuar la salida del motor a dicha curva; este sistema es la transmisión.

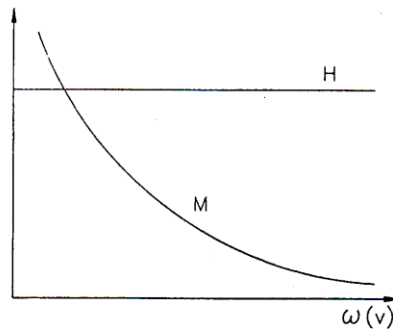


Figura 5: Curva ideal de par motor frente a potencia

La transmisión está constituida por un conjunto de elementos que tienen como misión conectar la salida del motor con las ruedas, haciendo llegar a estas el movimiento, los pares y la potencia necesarios para vencer las resistencias ya expuestas anteriormente. Puede ser de tipo hidrodinámica o de tipo mecánica

2.3.3 Frenado

El proceso de frenado es vital para el control de los vehículos automóviles, este sistema le da capacidad al conductor de reducir la velocidad de su vehículo hasta detenerlo, en el caso de que así se requiera.

La figura número 6 ayudará a analizar las fuerzas que intervienen durante este proceso. En esta figura, se ha modelizado un vehículo descendiendo sobre una pendiente de valor θ , cuyo propio peso enmarcado en la componente longitudinal ($P\sin\theta$), será la fuerza que se tiene que contrarrestar para hacer que el vehículo frene.

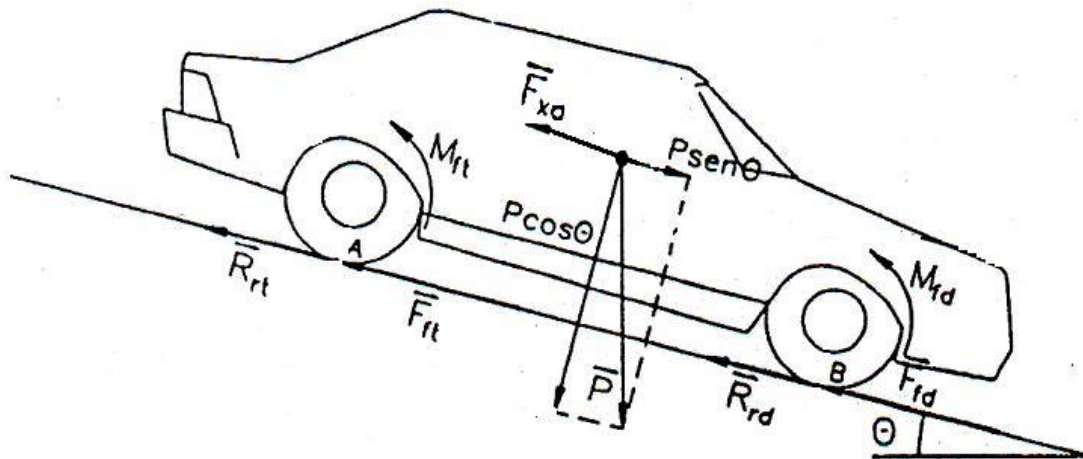


Figura 6: Solicitaciones que actúan sobre un vehículo en el proceso de frenado

A continuación se enuncian las fuerzas más importantes que toman parte en el proceso de frenado y el significado de las mismas:

Pares de frenado (M_{fd} y M_{ft}): El sistema de frenos del vehículo tiene como misión crear estos pares que se oponen al movimiento de las ruedas y que hacen aparecer las fuerzas de frenado.

Fuerza de frenado (F_{fd} y F_{ft}): Se llaman así a las fuerzas que se desarrollan como resultado de la interacción neumático-suelo y del momento de frenado aplicado a las ruedas que se opone al movimiento del vehículo. Si se presta atención a la figura 6 se ve que, como es lógico, que éstas aparecen en la interfase de contacto neumático-superficie de rodadura y son de sentido contrario a la marcha.

Estas fuerzas están limitadas por la capacidad del sistema de frenos y por la adherencia, siendo éste último el factor que suele ser crítico, de forma que aunque generalmente no se haya sobrepasado la capacidad de frenado del sistema de frenos, al sobrepasar el límite impuesto por la adherencia se produce el bloqueo de las ruedas.

Componentes del peso (P): Cuando el vehículo circula por terreno inclinado el peso se descompone en dos fuerzas. La primera de ellas en sentido longitudinal de la marcha ($P\sin\theta$) se opone o ayuda al movimiento del automóvil, según éste esté circulando por una pendiente ascendente o descendente. La segunda es el peso normal a la superficie de rodadura ($P\cos\theta$), que en condiciones normales se puede despreciar por trabajar con ángulo de la pendiente (θ) muy pequeño.

Resistencia a la rodadura (R_{rd} y R_{rt}): Aparece por el rozamiento neumático-suelo. Al igual que la fuerza de frenado se opone al movimiento del vehículo pero su magnitud es mucho menor que la de ésta.



Acciones aerodinámicas: La resistencia aerodinámica (F_{xa}) solo toma valores relevantes para altas velocidades, en el resto de los casos se puede despreciar frente a las fuerzas de frenado y el error cometido nos mantendrá del lado de la seguridad, por lo que se hace frecuentemente.

Resistencia del motor y transmisión: La resistencia que ofrece la transmisión puede ser despreciada en cálculos normales de frenado.

Sin embargo, en casos concretos, como puede ser el de un vehículo pesado en bajada prolongada, la retención efectuada por el motor es de suma importancia para preservar los elementos de fricción de los frenos de calentamientos y desgastes excesivos.

Es importante señalar, que en condiciones excepcionales como alta deceleración o frenadas de emergencia, el motor no va a ayudar a la frenada; por el contrario hay que sumar a la frenada, la inercia del motor.

2.3.3.1 Condiciones impuestas por la adherencia

En los procesos de frenado, el bloqueo de las ruedas se produce cuando el coeficiente de rozamiento neumático-calzada disminuye hasta un cierto valor inferior al de máxima adherencia. El bloqueo de las ruedas ocasiona una importante disminución de la fuerza de frenado y, además, puede provocar también la pérdida del control direccional del vehículo, ya que cuando las ruedas se bloquean se ha superado el límite de la adherencia neumático-calzada en dirección longitudinal.

2.4 DINAMICA LATERAL

El comportamiento direccional del vehículo viene definido por las acciones que el conductor realiza sobre el volante y por las que el medio externo ejerce sobre el vehículo, como pueden ser el aire, irregularidades en el firme, etc. En el primer caso, el sistema de dirección, debe ser capaz de permitir al conductor un fácil control del vehículo para elegir la trayectoria deseada, mientras que en el segundo está relacionado con el movimiento lateral, debiendo ser robusto y estable frente a perturbaciones externas, absorbiendo los transitorios originados por las condiciones de rodadura y por los cambios de dirección que el conductor pueda efectuar.

Las variables principales que definen el comportamiento lateral del vehículo son la **velocidad lateral**, la **velocidad de guiñada** (ψ) y la **velocidad de balanceo** (Φ).

Los factores constructivos fundamentales que determinan las características direccionales del mismo son: **dimensionales** (distancia entre ejes, vía), **reparto de masas**: (posición del centro de gravedad), **aerodinámicas** (coeficientes aerodinámicos de fuerza lateral y momento de guiñada), **neumáticos**, **suspensión**, **factores externos** (ángulo de incidencia del aire, irregularidades de la calzada, el radio de curva y peralte de la calzada y el coeficiente de adherencia) y **velocidad** (donde puede existir un valor crítico a partir del cual, el vehículo presenta un comportamiento inestable).

2.4.1 Circulación en curva

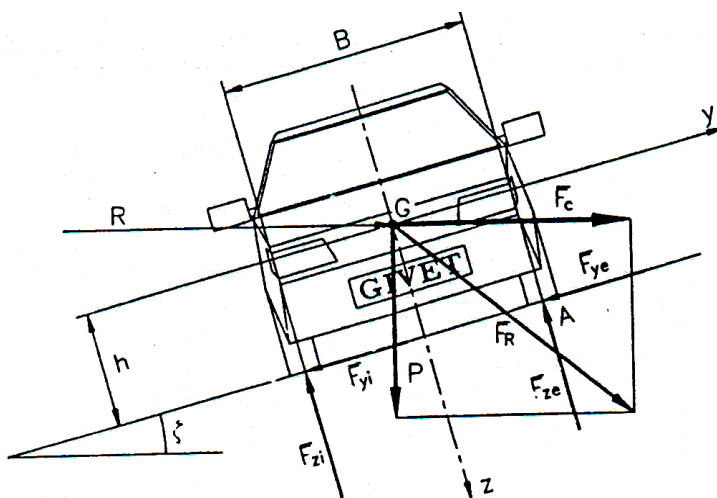


Figura 7: Fuerzas que actúan sobre un vehículo circulando en curva



Cuando un vehículo se encuentra circulando en curva a velocidad apreciable, la aceleración centrífuga no se puede despreciar como ocurría para el caso de bajas velocidades. Por tanto, aparece una fuerza centrífuga que es compensada de dos formas, mediante la aparición de fuerzas en la interfase neumático-calzada y mediante la aparición de un momento de vuelco. Para las primeras existirá una velocidad límite a partir de la cual se perderá la adherencia, mientras que en el segundo caso habrá también un límite a partir del cual dicho momento tomará valores muy elevados provocando el vuelco del vehículo.

Se va a estudiar estos dos límites partiendo del esquema de sollicitaciones mostrado en la figura 7.

Velocidad límite de derrape:

La velocidad a partir de la cual se podrá producir el derrape del vehículo se puede determinar de forma aproximada de la forma siguiente:

$$F_z = F_{zi} + F_{ze} = P \cdot \cos \xi + F_c \cdot \sin \xi$$

$$F_y = F_{yi} + F_{ye} = -P \cdot \sin \xi + F_c \cdot \cos \xi$$

Las fuerzas normales a la superficie de rodadura se relacionan con las fuerzas en la dirección “Y” de la siguiente forma: $(F_{zi} + F_{ze}) \cdot \mu_y = F_{yi} + F_{ye}$ con lo que se tiene:

$$(P \cdot \cos \xi + F_c \cdot \sin \xi) \cdot \mu_y = -P \cdot \sin \xi + F_c \cdot \cos \xi \quad (1)$$

Por otro lado se tiene la fuerza centrífuga que se expresa mediante la siguiente relación:

$$F_c = \frac{m \cdot V^2}{R} \rightarrow F_c = \frac{P \cdot V^2}{g \cdot R} \quad (2)$$

Con las ecuaciones (1) y (2) y haciendo $\mu_y = \mu_{\max}$ se obtiene la velocidad buscada:

$$V_{ld} = \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot (\mu_{y\max} + \operatorname{tg} \xi)}{1 - \mu_{y\max} \cdot \operatorname{tg} \xi}}$$

Que en el caso de que el peralte de la curva sea nulo, queda de la siguiente forma:



$$V_{id}(\zeta = 0) = \sqrt{g \cdot R \cdot \mu_{y\max}}$$

Velocidad límite de vuelco:

Si se presta atención en el gráfico anterior del coche, la condición límite de vuelco estará sobrepasada cuando la fuerza F_R corte a la superficie de rodadura más allá del punto exterior de la huella de contacto del neumático exterior. Se va a obtener dicho límite analíticamente. La condición de vuelco será:

$$\frac{F_y}{F_z} = \frac{-P \cdot \sin \zeta + F_c \cdot \cos \zeta}{P \cdot \cos \zeta + F_c \cdot \sin \zeta} \approx \frac{B}{2 \cdot h}$$

$$F_c = \frac{P \cdot V^2}{g \cdot R}$$

Con las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$V_{id} = \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot \left(\frac{B}{2 \cdot h} + \operatorname{tg} \zeta \right)}{1 - \frac{B}{2 \cdot h} \cdot \operatorname{tg} \zeta}}$$

Al igual que en el caso anterior si la curva no tiene peralte la expresión queda:

$$V_{id}(\zeta = 0) = \sqrt{g \cdot R \cdot \frac{B}{2 \cdot h}}$$

Consideraciones acerca de las velocidades anteriores:

Si se observa las expresiones obtenidas para cada una de las velocidades anteriores, se ve claramente que se puede pasar de una a otra sin más que cambiar μ_{\max} por $\frac{B}{2 \cdot h}$ y viceversa, por tanto se puede comparar ambos límites de la siguiente forma:

- Si $\mu_{y\max} = \frac{B}{2 \cdot h}$ ambas velocidades serán iguales por lo que el fenómeno del vuelco y el de derrape ocurrirán de forma simultánea.



- Si $\mu_{y\max} > \frac{B}{2 \cdot h}$ La velocidad de derrape será mayor que la de vuelco, por lo que el vehículo volcaría, si se alcanza dicho límite, sin llegar a derrapar. Este fenómeno se da en vehículos que tengan el centro de gravedad a una altura elevada cuando la adherencia de la vía sea suficiente. Normalmente estas características las cumplen los vehículos industriales circulando sobre pavimento seco.
- Si $\mu_{y\max} < \frac{B}{2 \cdot h}$ Se está en el caso contrario al anterior, el límite de vuelco es mayor que el de derrape, por lo que sucederá primero esto último. Este fenómeno se suele dar en turismos y vehículos industriales cuando la adherencia no es suficiente.

2.4.2 Comportamiento direccional del vehículo en régimen estacionario

El comportamiento direccional viene dado por el sistema conductor-vehículo, esto introduce un alto grado de incertidumbre en el comportamiento de éste último ya que la forma de conducir de cada persona es única e impredecible. Por ello, para éste análisis, se obviará la influencia del conductor, estudiando el vehículo por separado.

Las dos variables principales que determinan el comportamiento direccional del vehículo son: los ángulos girados por las ruedas directrices como respuesta a la actuación del conductor sobre el volante y los ángulos de deriva de los neumáticos. Estos últimos toman valores no nulos cuando existen fuerzas laterales aplicadas sobre el vehículo que propician la aparición de fuerzas de adherencia neumático-calzada.

2.4.2.1 Coeficiente de viraje (K_v)

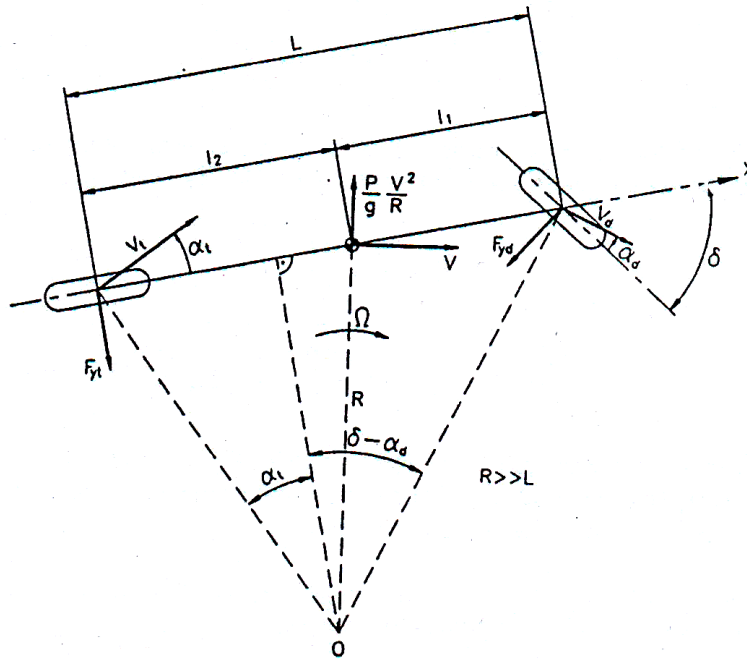


Figura 8: Modelo lineal para el cálculo de K_v .

Para el cálculo del coeficiente de viraje se supondrán condiciones estacionarias que serán la velocidad y el radio de la curva constantes durante todo el giro. Además se utilizará el modelo lineal de dos ruedas mostrado en la figura 8 con el fin de simplificar los cálculos. Como se puede ver en él, el vehículo gira con velocidad angular constante en torno a un eje de rotación fijo, por lo que estará sometido a una fuerza centrífuga, la cual es compensada por fuerzas laterales de adherencia en los neumáticos. Estas fuerzas provocan la aparición del fenómeno de deriva. Además se supondrá que el radio de la curva es muy superior a la batalla del vehículo. Teniendo en cuenta todo lo dicho anteriormente se va a obtener el coeficiente buscado.

Si se presta atención en la figura 8 se tiene:

$$\delta - \alpha_d + \alpha_t \approx \frac{L}{R} \Rightarrow \delta \approx \alpha_d - \alpha_t + \frac{L}{R} \quad (1)$$

Suponiendo que la fuerza centrífuga actúa en dirección perpendicular al plano longitudinal del vehículo y que los ángulos de dirección son pequeños:

$$\Sigma M_{ruedatrasera} = 0 \Rightarrow F_{yd} \approx \frac{I_2 \cdot P \cdot V^2}{g \cdot R \cdot L}$$

$$\Sigma M_{ruedadelantera} = 0 \Rightarrow F_{yt} \approx \frac{I_1 \cdot P \cdot V^2}{g \cdot R \cdot L}$$

Si se introducen los pesos en condiciones de reposo en las ruedas delantera (P_d y P_t) y trasera en las anteriores expresiones se tiene:

$$F_{yd} \approx \frac{2 \cdot P_d \cdot V^2}{g \cdot R}$$

$$F_{yt} \approx \frac{2 \cdot P_t \cdot V^2}{g \cdot R}$$

Y como $\alpha = \frac{F_y}{K_a}$ donde K_a es la rigidez de deriva de un neumático, suponiendo que el neumático tiene doble rigidez ya que representa a los dos de su eje, se obtienen las siguientes expresiones:

$$\alpha_d = \frac{F_{yd}}{2 \cdot K_{\alpha d}} = \frac{P_d \cdot V^2}{g \cdot R \cdot K_{\alpha d}}$$

$$\alpha_t = \frac{F_{yt}}{2 \cdot K_{\alpha t}} = \frac{P_t \cdot V^2}{g \cdot R \cdot K_{\alpha t}}$$

Sustituyendo estos valores en (1) se obtiene:

$$\delta = \frac{L}{R} + \left(\frac{P_d}{K_{\alpha d}} - \frac{P_t}{K_{\alpha t}} \right) \cdot \frac{V^2}{g \cdot R} \rightarrow \delta = \frac{L}{R} + K_v \cdot \frac{V^2}{g \cdot R}$$

Donde K_v es el coeficiente de viraje buscado, cuyo valor es:

$$K_v = \frac{P_d}{K_{\alpha d}} - \frac{P_t}{K_{\alpha t}}$$

2.4.2.2 Respuesta direccional

El comportamiento direccional del vehículo viene condicionado por el valor del coeficiente de viraje, así podemos distinguir tres casos diferentes:

- $K_v = 0 \Rightarrow \delta = \frac{L}{R}$ Cuando δ es independiente de V el vehículo es **neutro**
- $K_v > 0 \Rightarrow \delta = \frac{L}{R} + K_v \cdot \frac{V^2}{g \cdot R}$ Cuando δ crece al hacerlo V el vehículo es **subvirador**
- $K_v < 0 \Rightarrow \delta = \frac{L}{R} + K_v \cdot \frac{V^2}{g \cdot R}$ Cuando δ decrece al hacerlo V el vehículo es **sobrevirador**

Estos comportamientos se aprecian con claridad en la siguiente gráfica:

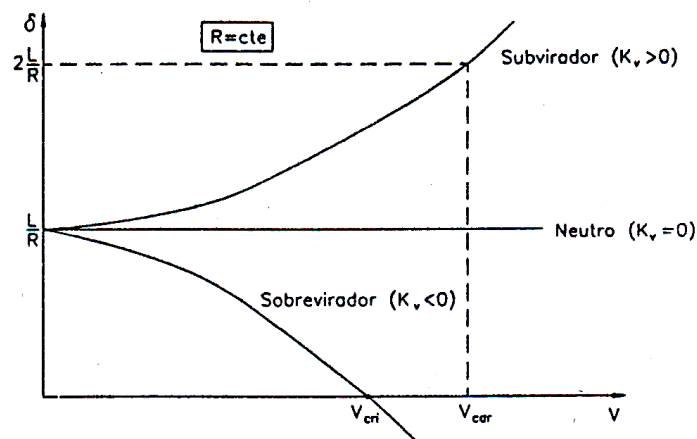


Figura 9: Respuesta direccional de vehículos subviradores, neutros y sobreviradores

Un vehículo neutro describirá una trayectoria de radio constante, mientras que uno sobrevirador describirá una trayectoria de radio decreciente con la velocidad y uno subvirador describirá una trayectoria de radio creciente con la velocidad.

En los vehículos sobreviradores el ángulo de guiado puede llegar a hacerse negativo a partir de un cierto valor de V , lo que produciría inestabilidad direccional y, además, implicaría que el conductor tendría que girar el volante en sentido contrario al de la curva, lo cual es totalmente indeseable.



Sin embargo, en los vehículos subviradores a pesar de tener una respuesta direccional menos sensitiva, el volante siempre tendrá que ser girado en el sentido de la curva para todo el intervalo de velocidades, aunque la proporción de giro deberá incrementarse con la velocidad.

Por último, los vehículos neutros presentan el problema de que al sufrir ligeros cambios, pueden pasar a presentar un comportamiento de vehículo sobrevirador.

Por tanto los vehículos actuales se suelen diseñar para que presenten un ligero comportamiento subvirador.

2.4.3 Sistema de dirección

El sistema de dirección es el encargado de transmitir a las ruedas el movimiento que el conductor aplica en el volante, es decir, es el sistema que permite al conductor el guiado del vehículo. Un correcto sistema de dirección, debe ser capaz de transmitir información acerca del estado de la carretera, pero además, dicha dirección no debe ser ni demasiado dura para no tener que realizar grandes esfuerzos a la hora de orientar las ruedas, ni demasiado sensible ya que pequeños movimientos del volante pueden producir cambios bruscos de la trayectoria.

Para conseguir esto, la dirección consta de múltiples elementos que la convierten en un sistema mecánico bastante complejo y que definen una serie de ángulos de suma importancia, los llamados ángulos de la dirección, que se verán con más detalle a continuación.

- **Avance:** Es la proyección sobre un plano paralelo a la superficie de rodadura, que se forma con la vertical al eje de giro. En la figura número 10 se puede ver claramente donde se sitúa este ángulo.

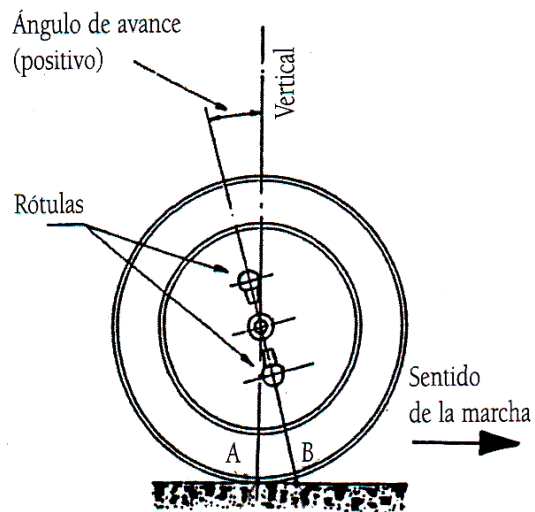


Figura 10: Angulo de Avance

Un avance excesivo hace que el brazo de palanca a que forma el centro de gravedad del vehículo con el punto de contacto de la prolongación del pivote con el suelo sea muy grande, y mover la dirección costaría mayor esfuerzo, dirección dura. Por el contrario, un avance escaso disminuye el brazo de palanca expresado haciendo la dirección excesivamente suave, dirección blanda

- **De salida:** Es la proyección sobre un plano perpendicular al plano longitudinal de simetría del vehículo, del ángulo agudo que forma con la vertical el eje de la mangueta. En la siguiente figura se puede apreciar de mejor manera.

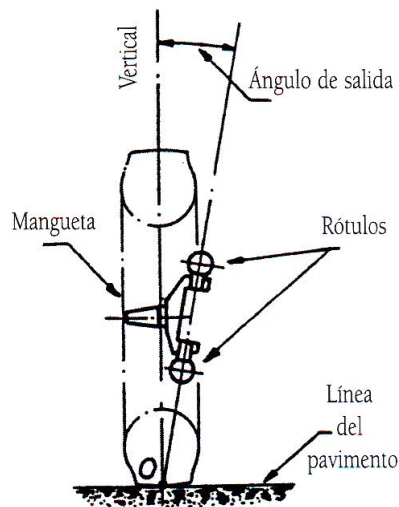


Figura 11: Angulo de Salida

El ángulo de salida favorece la estabilidad de la dirección y mantiene las ruedas en posición de línea recta, en caso de viraje ayuda a resistir la dirección recta después de la curva. Además reduce el esfuerzo de giro de la dirección, sobre todo cuando el coche está parado y contribuye a un menor desgaste del neumático.

- **Caída:** Es el ángulo que forma la mangueta con una línea horizontal situada en el plano vertical que pasa por este eje. Ángulo, que en la figura 12 siguiente se ve representado.

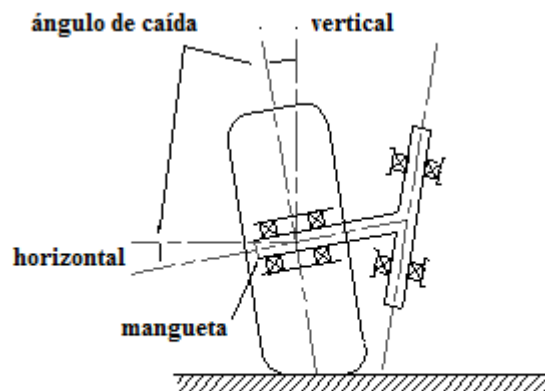


Figura 12: Angulo de Caída

Con un correcto ángulo de caída se consigue una mejora en la estabilidad lateral, un desgaste uniforme de los neumáticos, una mayor facilidad en el manejo de la dirección, haciéndola menos fatigosa y más segura a la vez que se evita que las irregularidades del terreno produzcan esfuerzos excesivos y perturbaciones sobre los elementos de la dirección.

- **Comprendido:** Se llama ángulo comprendido a la suma de los ángulos de caída y salida. En la figura 13 siguiente se aprecia mejor.

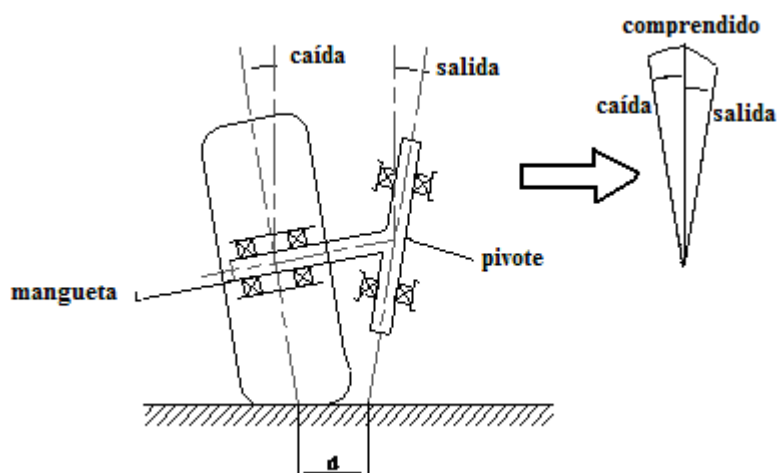


Figura 13: Angulo Comprendido

Si las ruedas tienen distintos ángulos de salida y caída, o de uno de los dos, existe una variación importante del comportamiento del vehículo.

- **Convergencia:** es el grado de cierre o de abertura de las ruedas cuando están en posición de marcha en línea recta. Cuando las ruedas tienden a “cerrarse”, se dice que son divergentes, mientras que si tienden a la “apertura”, serán convergentes. Se puede observar claramente en la siguiente figura.

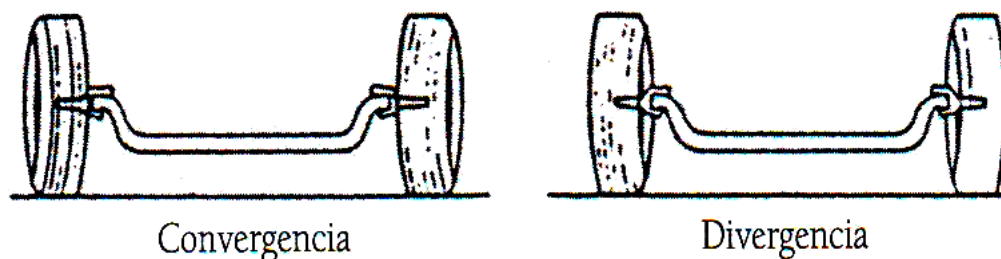


Figura 14: Convergencia y Divergencia de las ruedas

Si las ruedas no son motrices, la fuerza longitudinal, debida a la resistencia a la rodadura, está dirigida hacia atrás y tenderá a abrir las ruedas.

Por el contrario, cuando las ruedas sean motrices, tenderán a realizar el caso opuesto, y cerrarán las ruedas; por lo que es necesario que tengan cierta divergencia.

El ajuste incorrecto de la divergencia o convergencia de las ruedas delanteras produce un desgaste prematuro de los neumáticos y una dirección incierta.



2.5 DINAMICA VERTICAL

La dinámica vertical del vehículo, está prácticamente compuesta por el sistema de suspensión, por lo que hablar de dinámica vertical, es hablar de suspensión.

El comportamiento dinámico vertical del automóvil, está completamente relacionado con el confort que le llega a los ocupantes del vehículo y de la estabilidad que este presenta. Este confort, se puede ver influencia por dos grupos de acciones que se ven a continuación.

- **Acciones directas:** son aquellas ejercidas sobre la masa suspendida por elementos que la contienen o en los que se apoya. Dos ejemplos pueden ser el motor o la transmisión
- **Acciones indirectas:** son las transmitidas a la masa a través de masas semi suspendidas, como pueden ser las irregularidades del terreno, que son de carácter aleatorio.

Las principales funciones del sistema de suspensión son las siguientes:

- Proteger las diferentes partes del vehículo.
- Dotarle de estabilidad.
- Proteger las mercancías transportadas y proporcionar comodidad a los pasajeros reduciendo y absorbiendo los movimientos de la masa suspendida.
- Otras funciones son: soportar el peso del vehículo, transmitir las fuerzas de aceleración y frenada entre los ejes y el bastidor, conservar los ángulos de dirección en curva y reducir el efecto de las fuerzas excitadoras.

El sistema de suspensión consta principalmente de las siguientes partes: **mecanismo de conexión**; soportan los neumáticos, **resortes**; amortiguan los impactos de la superficie de rodadura, **amortiguadores**; absorben las vibraciones verticales de la carrocería y **estabilizadores**; que previenen a la carrocería de balanceos laterales. Estos elementos se pueden agrupar en dos grandes grupos:

- **Elementos elásticos:** Son uniones flexibles cuya finalidad es soportar el peso del vehículo, mantener la altura, permitir el desplazamiento relativo entre el bastidor y las ruedas y almacenar y liberar energía. Los componentes de este grupo son: las ballestas, muelles helicoidales, muelles de goma, estabilizadores y barras de torsión.

En la siguiente figura número 15 se puede ver un ejemplo de cada uno de ellos.

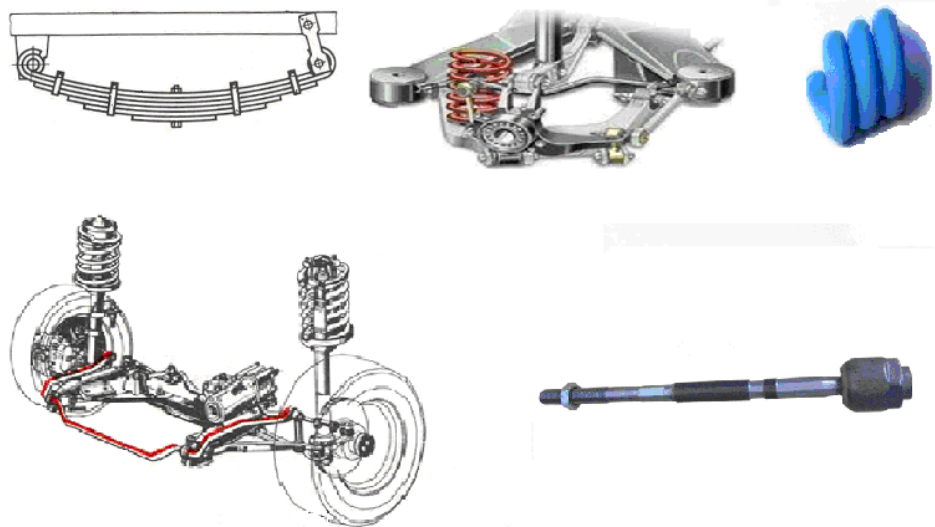


Figura 15: Ejemplos de elementos elásticos

- **Amortiguadores:** La función de los amortiguadores es evacuar la energía vibratoria transformándola en calor. Además, proporcionan confort, atenuando rápidamente las oscilaciones de la carrocería del vehículo. En este apartado se encontrarán los amortiguadores hidráulicos y los de fricción. De éste último se puede ver un ejemplo visual en la siguiente figura número 16.

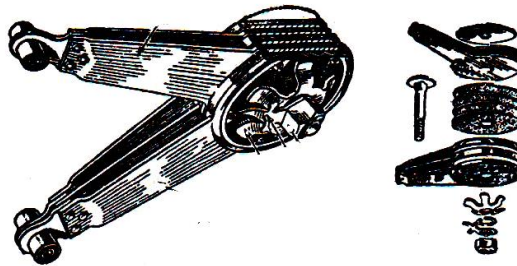


Figura 16: Esquema de un amortiguador de fricción

Respecto a los tipos de suspensión que se pueden encontrar en los vehículos, existen principalmente dos configuraciones: las suspensiones de eje rígido y las suspensiones independientes.

En la suspensión de eje rígido la unión de las ruedas se efectúa mediante un eje rígido, dando nombre a la configuración. Tiene la ventaja de que no varían ni la convergencia ni la

inclinación, pero sin embargo, al rodar sobre obstáculos laterales puede variar la caída de las ruedas, además su peso es mayor, por lo que el comportamiento del vehículo empeorará debido al incremento en la masa no suspendida.

La suspensión por eje rígido es técnicamente más simple, pero normalmente aporta menos confort y estabilidad que la suspensión independiente.

Las suspensiones independientes reducen las masas no amortiguadas, con lo que mejora el comportamiento del vehículo. Además disminuye las desviaciones de la rueda en contacto con el obstáculo por lo que mejora la adherencia sobre pisos irregulares y curvas.

A continuación, se ve en la figura número 17 un esquema de ambas y del comportamiento que muestran cada una de ellas frente a un obstáculo; como puede ser un bordillo.

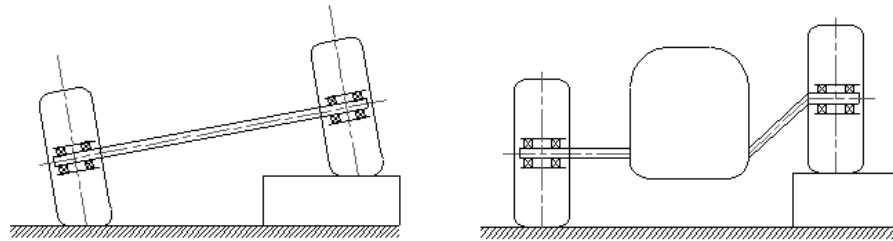


Figura 17: Comportamiento de una suspensión de eje rígido e independiente

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: [APA95], [ARI05], [BAS01], [BAS93], [BOT50], [CHA79], [MPI06] y [PAR79]



3 EL NEUMATICO Y SU INTERACCION CON LA CALZADA

Los neumáticos son, sin duda, uno de los componentes más importantes de los vehículos automóviles ya sean turismos, camiones, autobuses, motocicletas o cualquier otro tipo de vehículo rodante que circule fuera de la calzada como los aviones, etc.

Todos los esfuerzos que actúan sobre los vehículos (salvo los aerodinámicos, que actúan directamente sobre la carrocería), se generan en los neumáticos y actúan sobre el vehículo a través de ellos, siendo transmitidos a la carrocería a través de la llanta y de los elementos mecánicos que integran el sistema de suspensión.

Por otro lado, el neumático es responsable de alrededor del 20% del consumo de combustible del vehículo para condiciones normales de velocidad. Esto es debido a que cuando rueda, y especialmente en la frenada, la banda de rodadura se deforma en un rango de frecuencia elevado que corresponde a su deformación sobre las rugosidades del suelo. Esta deformación posibilita la adherencia a la calzada y genera una pérdida de energía útil.



3.1 PROPIEDADES DE LOS NEUMÁTICOS

Como ya se ha comentado, los neumáticos son parte fundamental del comportamiento dinámico que muestren los vehículos.

Las propiedades básicas que deben de tener todos y cada uno de ellos se muestran a continuación:

- Soportar y transmitir al terreno la carga vertical
- Generar los esfuerzos longitudinales necesarios para la tracción y frenado
- Proporcionar los esfuerzos laterales precisos para lograr el control y estabilidad de la trayectoria.
- Actuar como suspensión primaria, capaz de atenuar y filtrar las ondulaciones originadas por las irregularidades de la carretera.

Por último, se ha de señalar que del neumático se exigen características muy diversas y a veces contradictorias y difíciles de asociar, para lograr en el vehículo altas cotas de seguridad, confort, capacidad para alcanzar aceleraciones, deceleraciones y velocidad punta elevadas y al mismo tiempo economía, es decir, bajo costo y gran duración. Las características que principalmente se requieren son:

- Bajo nivel de ruidos y de generación de vibraciones (confort).
- Adecuada flexibilidad radial, circunferencial y transversal.
- Baja resistencia a la rodadura (economía).
- Elevada adherencia sobre pista seca y mojada, tanto longitudinal como transversal (permite aumentar la seguridad y las prestaciones).
- Resistencia a la fatiga, al desgaste, a la formación de grietas por cristalización del caucho, etc. (seguridad y duración).

3.2 ESTRUCTURA DE LOS NEUMÁTICOS

El neumático es un componente muy complejo, en cuya fabricación se utilizan gran número de componentes. Para fabricar un neumático convencional se utilizan del orden de 15 a 20 compuestos diferentes, más otros tantos aceites o resinas de proceso. Variaciones ínfimas (del orden de 0,1%) en sus cantidades o en el proceso de fabricación (temperaturas o tiempos de permanencia), pueden dar lugar a características finales muy diferentes.

En la figura número 18 se pueden observar un corte transversal a un neumático, donde se muestran las partes fundamentales de las que éste está compuesto.



Figura 18: Partes componentes de un neumático

- 1) **Cubierta:** Es una capa de caucho sintético que se encuentra en el interior de neumático y sirve de cámara de aire.
- 2) **Lona de carcasa:** la carcasa está compuesta por cables delgados de fibras textiles en arcos dispuestos en ángulos rectos y pegados al caucho. Estos cables son elementos clave en la estructura del neumático y gracias a ellos podrá resistir la presión. En una lona de neumático de coche, existen unos 1400 cables, cada uno de ellos puede resistir una fuerza de 15 kg.
- 3) **Relleno de la zona baja:** Tiene el papel de transmitir los pares de motor o de frenado de la llanta hacia la zona de contacto con el suelo.
- 4) **Aros:** Los aros sirven para que el neumático se ajuste a la llanta. Pueden soportar hasta 1800 kg sin riesgo de ruptura.
- 5) **Flancos:** Los flancos de goma flexible protegen el neumático de los choques que podrían dañar la carcasa, como por ejemplo, los choques contra los bordillos de las aceras. Además, en los flancos se rotulan las características marcadas por el fabricante para cada uno de ellos.



- 6) **Lomas de cima:** Están armadas con cables de acero muy finos pero muy resistentes que están cruzados oblicuamente y pegados unos a otros. El cruce de sus hilos con los de la carcasa forma triángulos indeformables. La disposición en triangulación, garantizan la rigidez de la cima.
- 7) **Banda de rodamiento:** La banda de rodamiento se coloca encima de las lonas de cima. Esta parte será la que interactúe con el suelo y en definitiva, la que transmita los esfuerzos longitudinales y transversales para la correcta tracción, frenado y control de la trayectoria. La mezcla de goma que la constituye tiene que ser adherente a todo tipo de superficie, resistir al desgaste, a la abrasión y tiene que calentarse poco. Para lograr que el neumático tenga una buena respuesta y mantenga la adherencia tanto en suelo mojado como en suelo seco se realizan dibujos en la banda de rodamiento. Por tanto en función de esto se tienen neumáticos para lluvia, para suelos secos y mixtos, en los que se ha llegado a una solución de compromiso entre los dos anteriores.

3.3 TIPOS DE NEUMÁTICOS

Como se ha visto anteriormente, la composición de los neumáticos es muy compleja y esto da a lugar a varios tipos de ellos.

Una clasificación que se usa muy a menudo, es según la disposición de las diferentes capas que forman la cubierta (lonas de carcasa, relleno de la zona baja y las lomas de la cima), según ésta, podemos distinguir tres tipos de neumáticos:

-Neumáticos diagonales o convencionales: La carcasa está formada por un cierto número de lonas cuyas fibras se orientan alternativamente formando ángulos iguales, y de sentido contrario, respecto a la línea circunferencial media de la propia carcasa. Este ángulo recibe el nombre de ángulo de cordones β y es la variable que más influye en la forma del contorno del neumático. Valores pequeños de β mejoran el comportamiento lateral disminuyendo la capacidad de carga y el confort que proporciona el neumático y viceversa.

-Neumáticos radiales: Hoy en día han desplazado casi en su totalidad a los diagonales. La carcasa está formada por una o más lonas cuyos cables se orientan radialmente entre los talones de forma que el ángulo de cordones es igual a 90° . Esta estructura es estabilizada por un cinturón de ancho algo inferior al del neumático, que se sitúa entre carcasa y banda de rodadura y está formado por un paquete de capas textiles o metálicas, cuyos cordones se alternan con ángulos $\beta \leq 20^\circ$.

Este tipo de neumáticos requiere menos lonas en la carcasa consiguiéndose flancos más flexibles y su banda de rodadura está dotada de mayor rigidez, lo que hace disminuir sus deformaciones en recta y curvas, aumentando la superficie de contacto con el suelo. Gracias a todo esto presentan mejores prestaciones que los diagonales, un mejor control de la trayectoria y estabilidad, una menor resistencia a la rodadura y una duración mayor.

-Neumáticos diagonales tinturados: Presentan propiedades intermedias entre los dos tipos anteriores. Se construye con un cinturón de bajo ángulo de cordones sobre una carcasa convencional. El cinturón confiere gran rigidez a la banda de rodadura.

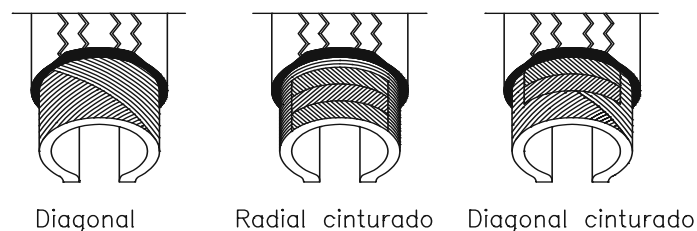


Figura 19: Tipos básicos de estructura en los neumáticos

3.4 ANALISIS DINAMICO DEL NEUMATICO

Para analizar las componentes de la fuerza y momento resultante, que actúan sobre el neumático, como consecuencia de su interacción con el suelo, se utiliza el sistema de ejes recomendado por SAE, que se representa en la figura 20.

A continuación se explica el significado de las sollicitaciones que aparecen representadas en él así como de algunos planos de interés de la rueda.

Plano de la rueda: Plano medio del neumático perpendicular al eje de rotación.

Centro de la rueda: Punto de intersección entre el eje de rotación y el plano de la rueda.

Centro de la superficie de contacto: Punto de intersección del plano de la rueda y la proyección de su eje de rotación sobre el plano de rodadura.

Fuerza longitudinal F_x : Componente respecto al eje X de la fuerza que actúa sobre el neumático, como consecuencia de su interacción con el suelo.

Fuerza longitudinal F_y : Ídem a la anterior pero respecto al eje Y.

Fuerza longitudinal F_z : Ídem a la anterior pero respecto al eje Z.

Angulo de deriva: Es el ángulo que forma la dirección de desplazamiento del centro de la superficie de contacto y la línea de intersección del plano de la rueda con la superficie de rodadura.

Angulo de caída: Es el ángulo formado por el plano X-Z y el plano de la rueda.

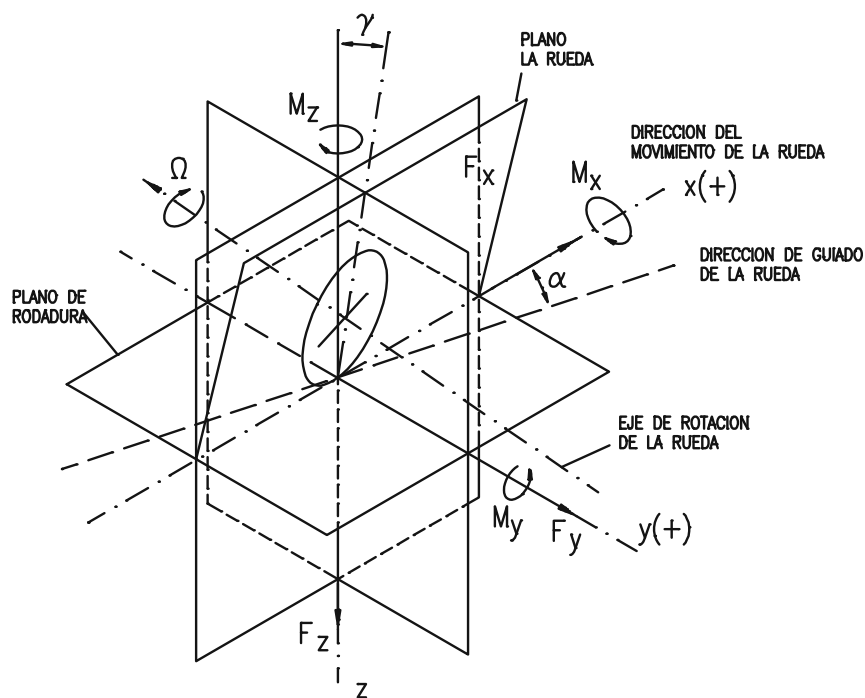


Figura 20: Sistema de referencia SAE para el neumático

La aparición de momentos en las tres direcciones del espacio es debida a la actuación de un sistema de fuerzas distribuido formado por la presión normal y los esfuerzos cortantes que aparecen en la interfase neumático-calzada por efecto de la adherencia entre ambos cuerpos. La resultante de estas fuerzas no coincide con el centro de la huella de contacto por lo que existe un brazo de par respecto a cada eje coordenado, que creará estos momentos. Además, debido a esto, la distribución de presiones en la huella de contacto no es simétrica (ver figura 21). Esta situación se daría en el caso de que solo actuara sobre el neumático la fuerza F_z .

Por otro lado, es importante resaltar que la carga vertical de un neumático es soportada por el aire a presión y la carcasa. La proporción que cada uno de ellos soporta de dicha carga viene dada tanto por el tipo de neumático como por las condiciones operativas del mismo.

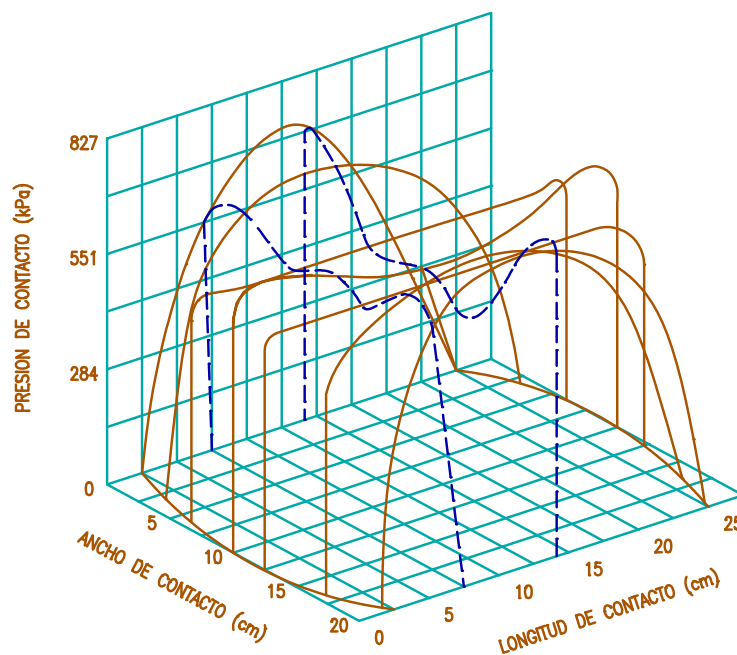


Figura 21: Distribución de presiones en la huella del neumático

3.4.1 Rigidez radial (K_z)

Debido al carácter elástico del neumático, a la compresibilidad del aire y al estar éste solicitado entre otras fuerzas por el peso del vehículo, se produce un incremento de presión en su interior que puede llegar a ser del orden de dos a tres veces su valor nominal, además aparece una huella de rodadura no nula ya que éste se ve deformado por dicha presión. Para cuantificar esta

deformación aparece el concepto de rigidez radial (K_z), que junto con el amortiguamiento equivalente permiten modelizar de forma sencilla el neumático como un resorte y un amortiguador en paralelo.

La rigidez radial está influenciada por varios parámetros, el más importante es la presión de inflado, pero también se pueden citar la velocidad, la temperatura, el ángulo de caída, etc.

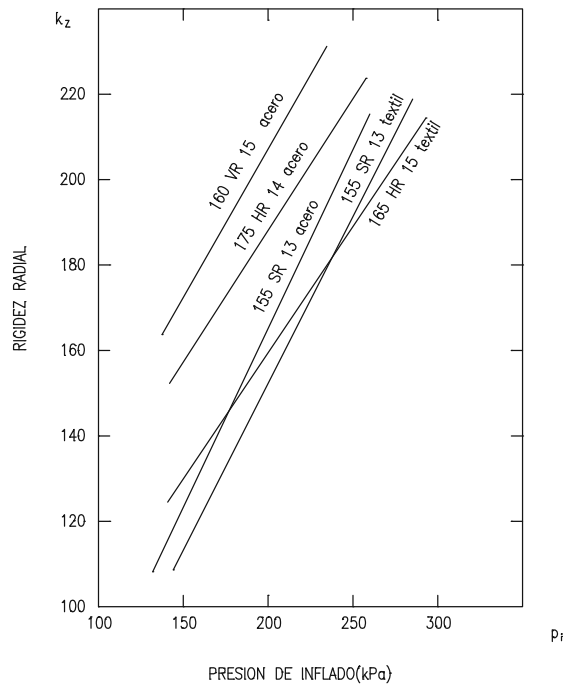


Figura 22: Variación de la rigidez radial con la presión de inflado dependiendo del tipo de neumático

Según la forma de obtención de K_z se puede diferenciar tres tipos: rigidez radial estática (K_{ze}), rigidez radial dinámica sin rodadura (K_{zd}) y rigidez radial dinámica (K'_{zd}). Esta última es la más importante y se determina mediante ensayos de rodadura sobre un tambor o cinta deslizante midiendo su frecuencia de resonancia.

3.4.2 Coeficiente de resistencia a la rodadura (f_r)

En ausencia de par en el eje de un neumático, para conseguir que este se mueva, es necesario aplicarle una fuerza paralela al plano de rodadura. Para compensar esta fuerza aparece en dicho plano de rodadura una fuerza de igual magnitud pero sentido contrario a la anterior, esta fuerza



tiene el nombre de resistencia a la rodadura (R_R) y provoca una pérdida de potencia debida a histéresis, rozamiento, etc. Por otro lado se tiene el peso que soporta el neumático (P). De esta manera queda definido el coeficiente de resistencia a la rodadura como el cociente de ambos.

$$f_r = \frac{R_R}{P}$$

Los principales parámetros que influyen sobre la resistencia a la rodadura son los siguientes: **velocidad** (a mayor velocidad, una mayor deformación más rápida del neumático con lo que se incrementa el trabajo disipado por ciclo y aparecen fenómenos vibratorios), **presión de inflado** (al aumentar la presión, aumenta la rigidez y esto hace variar la deformación), **carga sobre el neumático** (al aumentar la carga aumenta la deformación y en consecuencia la resistencia a la rodadura), **temperatura** (el incremento de ésta, disminuye las pérdidas de potencia y la resistencia a la rodadura) y **esfuerzos longitudinales** (al actuar sobre el neumático un momento de tracción o frenado, aparece un esfuerzo longitudinal en la interfase neumático-suelo que hace aumentar la deformación de éste con el consiguiente incremento de la resistencia a la rodadura que ello conlleva).

3.4.3 Tracción y frenado

Si se aplica en el eje de la rueda un momento tractor, éste producirá una fuerza en la interfase neumático-suelo que crea un momento que se opone al primero. Estos momentos hacen que el neumático se deforme, comprimiéndose la banda de rodadura a la entrada de la zona de contacto con el suelo y estirándose a la salida. Esto provoca una disminución de la zona de contacto neumático-suelo por lo que la velocidad de desplazamiento del eje de la rueda será menor que la teórica ($\Omega \cdot r$). Esta pérdida de velocidad puede ser tomada como un deslizamiento (i) de valor:

$$i = 1 - \frac{V}{\Omega \cdot r} = 1 - \frac{r_e}{r}$$

Donde V es la velocidad de traslación del eje de la rueda

Ω es la velocidad angular de la rueda

r_e es el radio efectivo de rodadura del neumático ($r_e < r$)

i es el deslizamiento longitudinal

El deslizamiento longitudinal es importante en la generación de esfuerzos longitudinales neumático-suelo.

En el caso de que el par aplicado sea de frenado el resultado es el opuesto, siendo mayor V que $\Omega \cdot r$ por lo que el deslizamiento se expresa de la siguiente forma:

$$i_p = 1 - \frac{\Omega \cdot r}{V} = 1 - \frac{r}{r_e}$$

En esta ecuación se ve claramente como cuando el deslizamiento es del 100% ($i_p = 1$) las ruedas están bloqueadas ya que $\Omega = 0$.

Se denomina coeficiente de esfuerzo a tracción μ_{xt} a la relación entre el esfuerzo F y la carga P que gravita sobre el neumático. En la figura 23 se puede ver la variación del mismo frente al deslizamiento. Se pueden distinguir tres zonas:

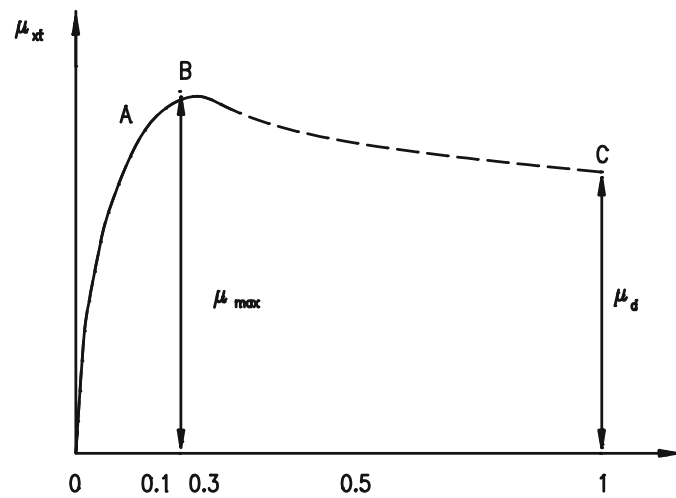


Figura 23: Variación de μ_{xt} frente al deslizamiento

-Zona OA: La variación del coeficiente es prácticamente lineal, lo cual es debido a que el deslizamiento se da únicamente por deformación de la banda de rodadura.

-Zona AB: La variación del coeficiente deja de ser lineal y aumenta hasta el valor μ_{max} , esto es debido a que al aumentar el par sobre la rueda comienza el deslizamiento físico del neumático sobre la superficie de rodadura en la parte posterior de la zona de contacto.

-**Zona BC:** Al aumentar el par aplicado a la rueda el deslizamiento se extiende rápidamente a toda la superficie de contacto. Estamos en la situación de deslizamiento puro ($i=1$). El coeficiente desciende ligeramente hasta un valor μ_d (coeficiente de adherencia en deslizamiento).

Además, el coeficiente de esfuerzo a tracción está influido por la velocidad, de forma que la variación de los valores de μ_{\max} y μ_d es inversamente proporcional a ésta. En la siguiente tabla se muestra el valor del coeficiente de adherencia en deslizamiento para distintas situaciones.

Superficie	Valor máximo μ_{\max}	Valor de deslizamiento μ_d
Asfalto y hormigón secos	0.8-0.9	0.75
	0.5-0.7	0.45-0.6
Asfalto mojado	0.8	0.7
Hormigón mojado	0.6	0.55
Grava	0.68	0.65
Tierra seca	0.55	0.4-0.5
Tierra húmeda	0.2	0.15
Nieve dura	0.1	0.07
Hielo		

Tabla 3: Valores del Coeficiente de Adherencia en Deslizamiento dependiendo del tipo de terreno y las condiciones del mismo

3.4.4 Esfuerzos transversales sobre el neumático: Deriva

Cuando debido a la aceleración centrífuga en curvas o al empuje del aire existe una fuerza lateral sobre el neumático, ésta hace que aparezca una fuerza que se oponga a ella en la superficie de interacción neumático-suelo. Ambas fuerzas causan que el neumático sufra una ligera deformación transversal, que le hace seguir una trayectoria desviada un ángulo α (**Angulo de deriva**) de la dirección del plano de la rueda que sería la esperable en ausencia de fuerzas laterales. Este fenómeno es de vital importancia en el control direccional y en la estabilidad de los vehículos automóviles, siendo de especial importancia la relación entre la fuerza transversal y el ángulo de deriva, ya que define las propiedades del neumático.

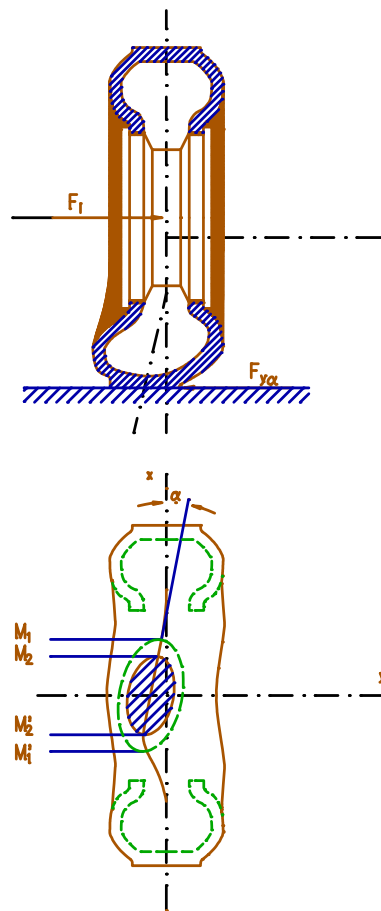


Figura 24: Deformada del neumático bajo la acción de fuerzas laterales

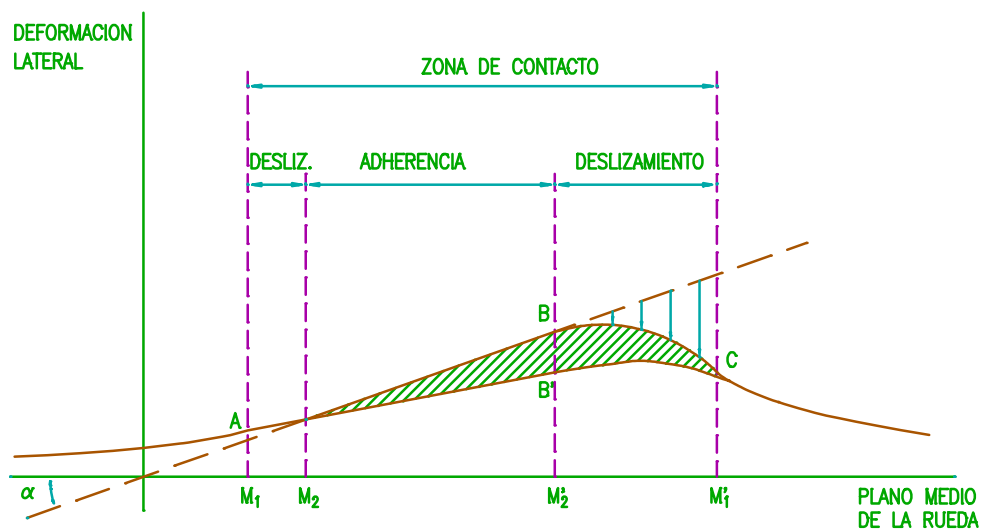


Figura 25: Deformación y deslizamiento lateral en la huella de contacto neumático -suelo



Donde:

A B C	Línea ecuatorial deformada del neumático.
M1A	Deformación lateral en el punto inicial de contacto, debido a la deformación de la carcasa.
M2B	Deformación total en el límite de la zona de adherencia.
B B'	Deformación de la banda de rodadura.
M2B'	Deformación de la carcasa.

Un parámetro que representa bastante fielmente el comportamiento de deriva del neumático en el intervalo usual de las condiciones operativas, es decir, para ángulos de deriva pequeños es la **rigidez de deriva (K_α)** que viene definida por la siguiente expresión:

$$K_\alpha = \left(\frac{\delta F_y}{\delta \alpha} \right)_{\alpha=0}$$

Por otro lado, es importante citar los principales factores que afectan al comportamiento transversal del vehículo y por tanto a la deriva del mismo, estos son:

-Características estructurales y geométricas del neumático: Siendo las de mayor influencia las correspondientes al diseño y construcción de la carcasa y el tamaño y la forma de la sección transversal.

-La carga normal: Tiene una influencia importante sobre el fenómeno de la deriva, ya que en general la fuerza de deriva aumenta con la carga normal, para un valor constante del ángulo de deriva. La capacidad relativa para soportar esfuerzo lateral disminuye al aumentar la carga, este efecto puede evaluarse mediante el coeficiente de deriva (C_α) que se define por la siguiente relación:

$$C_c = C_\alpha = \frac{K_\alpha}{F_z}$$

Además es reseñable el fenómeno de la transferencia de carga en curva entre ruedas de un mismo eje, el cual puede afectar de forma considerable al comportamiento direccional del vehículo cuando la aceleración lateral es elevada.

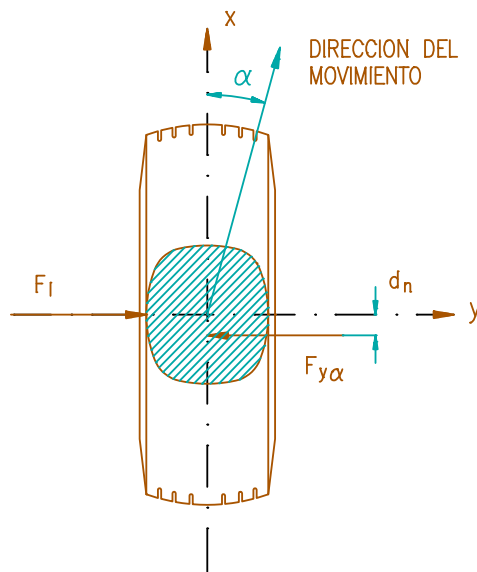


Figura 26: Angulo de deriva en un neumático

-**La presión de inflado:** Tiene una influencia moderada, aumentando la deriva para presiones bajas.

-**Esfuerzos longitudinales:** Al aplicar simultáneamente un esfuerzo longitudinal y uno transversal, para pequeños valores del primero la tracción hace aumentar el ángulo de deriva mientras que el frenado lo disminuye, aunque ambos de forma moderada. Sin embargo, si el esfuerzo longitudinal es de un valor cercano al de la fuerza adherente disponible, el ángulo de deriva aumenta notablemente hasta la situación de deslizamiento total.

-**Angulo de caída:** El ángulo de caída con el que se diseñan en la actualidad los sistemas de dirección de los automóviles crea una fuerza transversal que, para ángulos similares, es mucho más pequeña que la de deriva. Además, teniendo en cuenta que la magnitud que se suele usar para los ángulos de caída es de alrededor de 1° , se puede decir que su influencia en la deriva es mínima.

3.4.5 Momento Autoalineante

La fuerza transversal de contacto entre el neumático y el suelo, debido a que la distribución de presiones en la huella del neumático no es uniforme, suele actuar retrasada respecto al centro de dicha huella. Esta distancia recibe el nombre de **avance del neumático**. El producto de esta distancia

por la fuerza transversal anteriormente citada es el momento autoalineante. Aunque en realidad este momento es la suma de los momentos creados respecto al eje Z por las fuerzas de deriva y de caída cobra mayor importancia la primera de las dos.

Es deseable un momento autoalineante positivo ya que cuando también el ángulo de deriva lo es, este momento tiende a alinear el plano medio de la rueda con la dirección del movimiento. Un valor negativo del momento autoalineante originaría un efecto opuesto, tendería a aumentar el ángulo de giro de las ruedas, y reclamaría del conductor una acción sobre el volante, de sentido contrario al de la curva recorrida, existiendo el riesgo de inestabilidad direccional. Este efecto es sumamente indeseable.

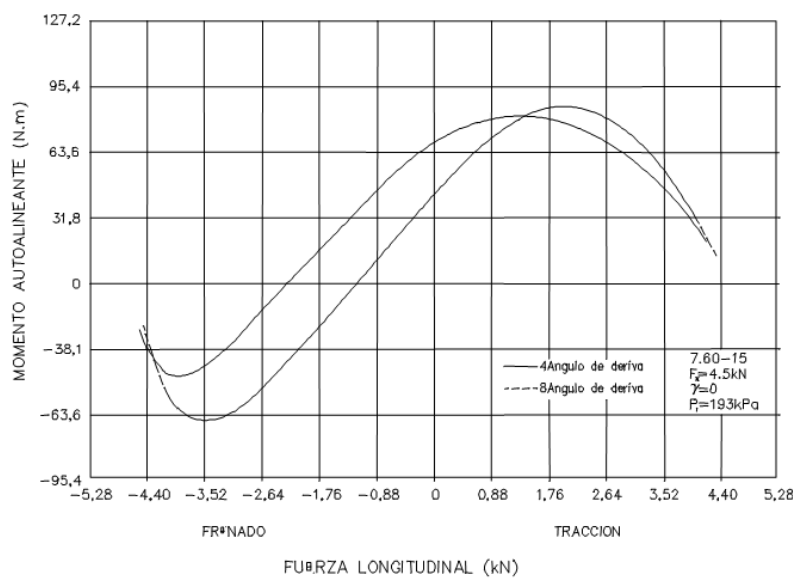


Figura 27: Variación del Momento Autoalineante dependiendo del esfuerzo aplicado

Por otro lado al aplicar un momento tractor se incrementa el momento autoalineante, mientras que al aplicar un par de frenado ocurre lo contrario. Todo esto se ilustra en la figura 27

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: [APA95], [ARI05], [BUR97], [DIA01], [VID65], [WWWMIC] y [WWWPIR]

4 MATERIALES Y METODOS

Como ya se ha comentado en el capítulo primero, la finalidad de este proyecto es analizar la influencia del ángulo de convergencia cuando un vehículo se encuentra circulando tanto en curva como en recta bajo distintas condiciones. En el caso estudiado, el principal elemento de trabajo utilizado ha sido el software de simulación. En concreto, se ha optado por realizar el estudio mediante CarSim®, un estándar a nivel mundial utilizado ampliamente en la industria automovilística para el análisis y simulación de todo tipo de vehículos. A continuación se describen tanto la forma de trabajar con el mismo, como las posibilidades que ofrece al analista.

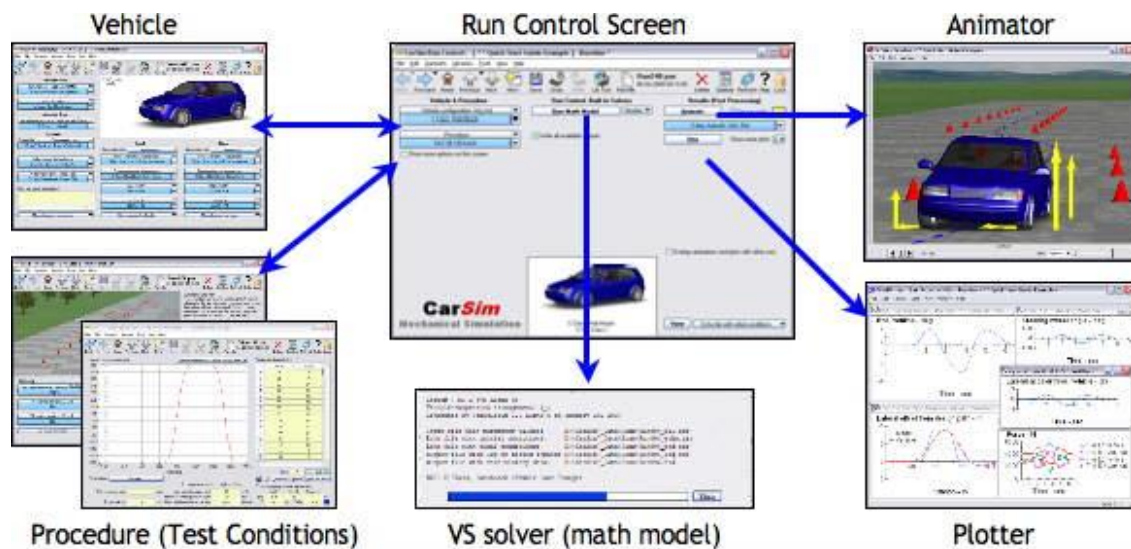


Figura 28: Módulos del software CarSim®.



4.1 SOFTWARE DE SIMULACION: CarSim®

CarSim® simula el comportamiento dinámico de vehículos tanto de pasajeros como de competición, camiones ligeros, etc. Crea animaciones de las pruebas simuladas y genera alrededor de seiscientos variables de salida que, posteriormente, pueden ser representadas mediante distintos tipos de gráficos y analizadas o exportadas a otro software como Matlab®, Excel® o herramientas de optimización.

CarSim® ayuda al ingeniero analista a diseñar y desarrollar pruebas abarcando toda la dinámica vehicular mediante las cuales pueda tomar mejores y más rápidas decisiones. La principal utilidad de este software reside en su potencial para realizar el primer test del problema, seleccionar componentes y crear avanzados análisis de vehículos existentes.

Este software combina un completo modelo matemático de vehículos con un solver de alta velocidad de resolución. Las animaciones de los tests realizados pueden reproducirse a velocidades de hasta diez veces la real, lo que permite visualizar los resultados rápidamente. Además ofrece la posibilidad de repetir el análisis todas las veces que sea necesario y de combinar varios análisis en la misma animación, de forma que se pueden detectar rápidamente los distintos patrones de comportamiento.

Obviamente un software de este tipo tiene poca utilidad si sus resultados no son fieles a la realidad, este es uno de los puntos en los que CarSim® tiene una de sus principales virtudes, ya que predice con gran exactitud el comportamiento real del vehículo.

Otro de los puntos a destacar es que es extensible. Los modelos matemáticos de CarSim® cubren la totalidad de los sistemas del vehículo y las variables debidas al conductor, al terreno y a la aerodinámica. Pero además, dichos modelos pueden complementarse utilizando Matlab®/Simulink® para incluir nuevas características o variar ciertos subsistemas o modelos de componentes como los neumáticos, frenos, etc.

4.1.1 Forma de trabajar con CarSim®

CarSim® tiene un interface bastante intuitivo, conociendo el funcionamiento general del programa se pueden realizar numerosos tests. Navegando por las pantallas, los diferentes menús y consultando las bibliotecas, se puede llegar al análisis final buscado.

Una vez lanzado el programa se puede encontrar la pantalla de control general, la cual está dividida en tres partes claramente diferenciadas:

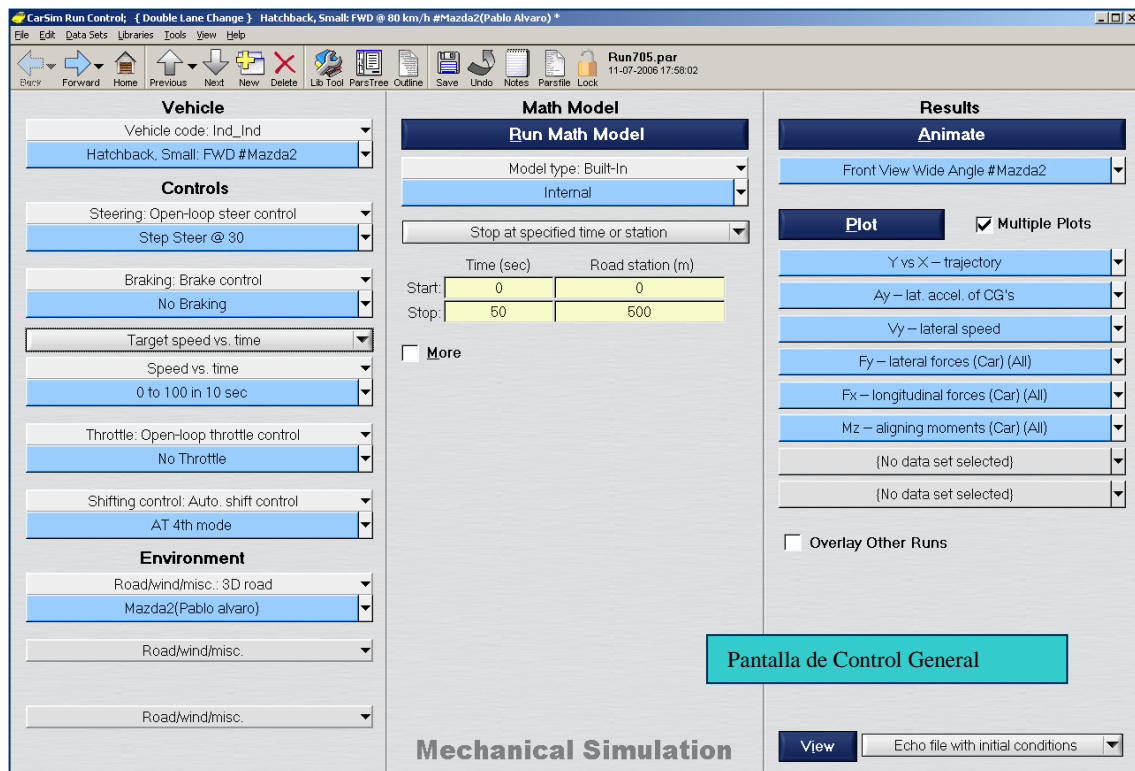


Figura 29: Pantalla de control general de CarSim®

1.-Parte izquierda “Control general”: Mediante esta zona se pueden variar todos los parámetros que permite el programa para definir el análisis a realizar. Para ello existen varias pestañas, mediante cada una de las cuales se accede a una serie de submenús que agrupan un número de variables relacionadas. En la siguiente figura se describen dichas pestañas.

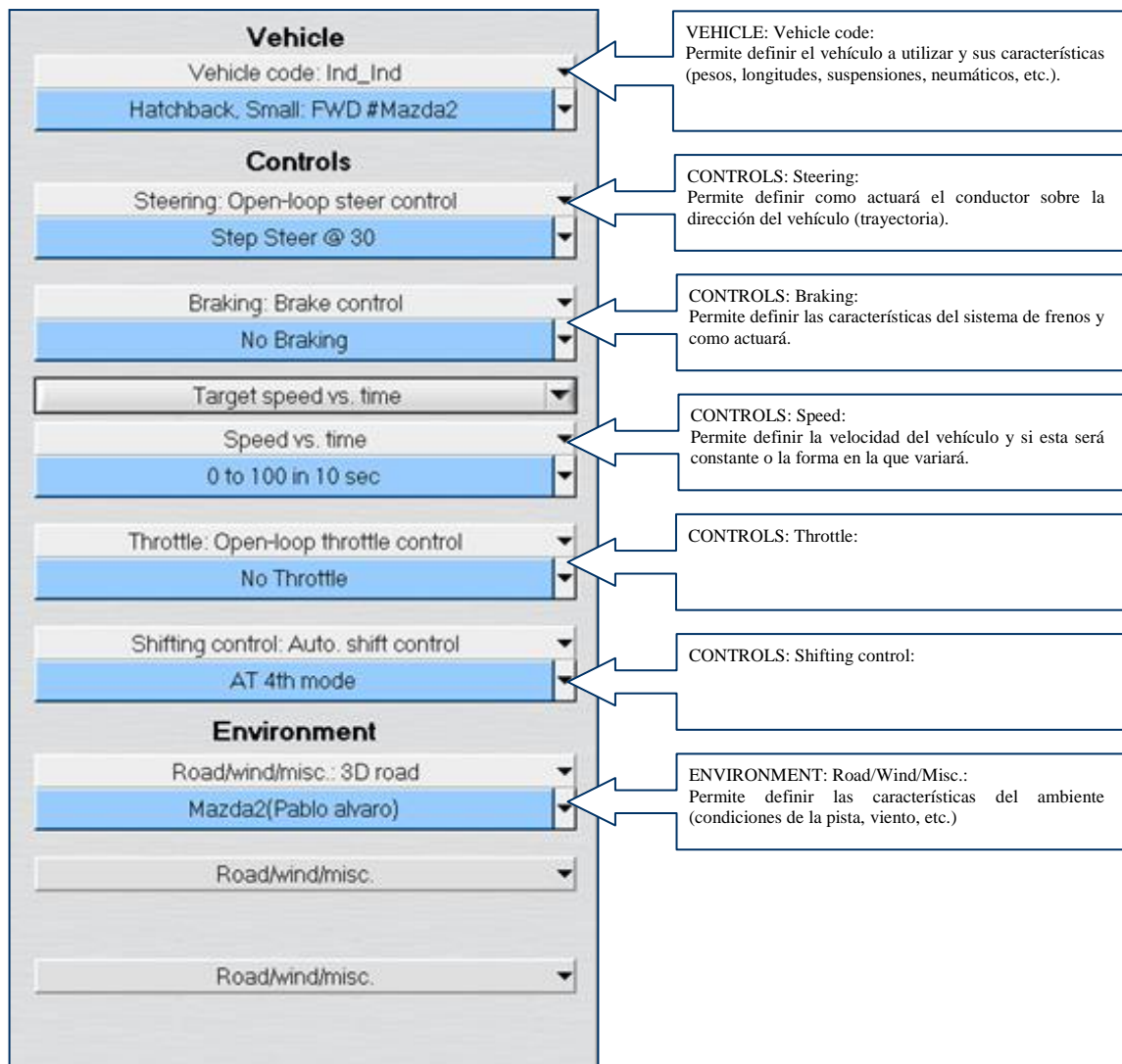


Figura 30: Detalle del tercio izquierdo de la pantalla de control general.

El funcionamiento de las pestañas es el siguiente: mediante la flecha que se encuentra en la parte superior derecha se accede a la biblioteca de la pestaña correspondiente. Una vez seleccionada la característica a variar, mediante la flecha de la parte inferior derecha se accede a otra biblioteca de posibilidades dentro de la característica seleccionada. Por último, pinchando en la zona azul se abre otra pantalla en la que se pueden variar los parámetros que se deseen y cuyo funcionamiento es idéntico al de la pantalla de control general. Por ejemplo, pinchando en la zona azul de la primera pestaña, se accede a la **pantalla 1**, y si se vuelve a pinchar en la zona azul de la primera pestaña de esta nueva pantalla se llega a la **pantalla 2** y se pueden variar el valor de las longitudes y pesos del vehículo (ver figura 31).

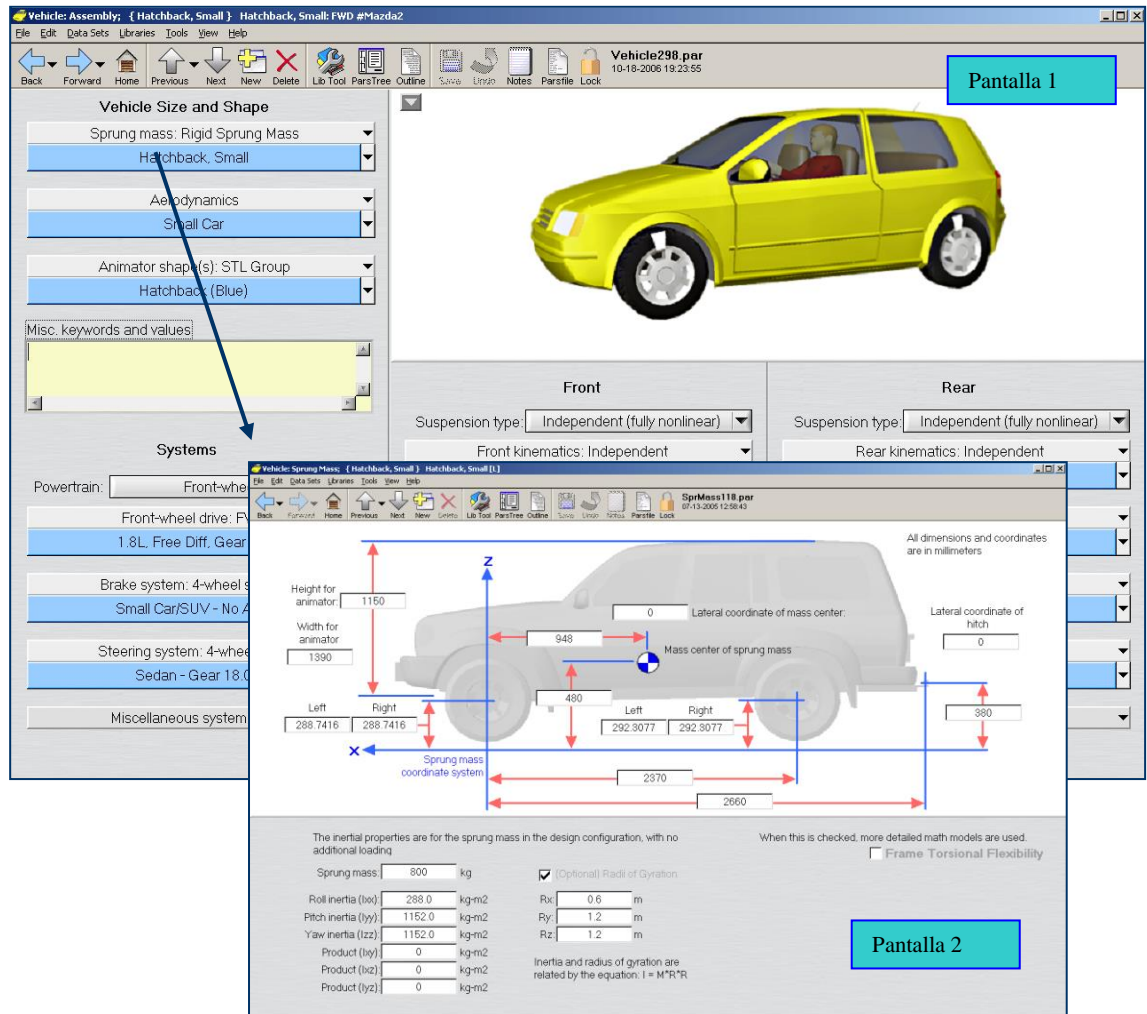


Figura 31: Esquema de funcionamiento de CarSim®.

2.-Parte central “MATH MODEL”: Mediante esta parte se resuelve el modelo introducido mediante la parte izquierda y se puede variar el tiempo de simulación, el espacio recorrido, etc.

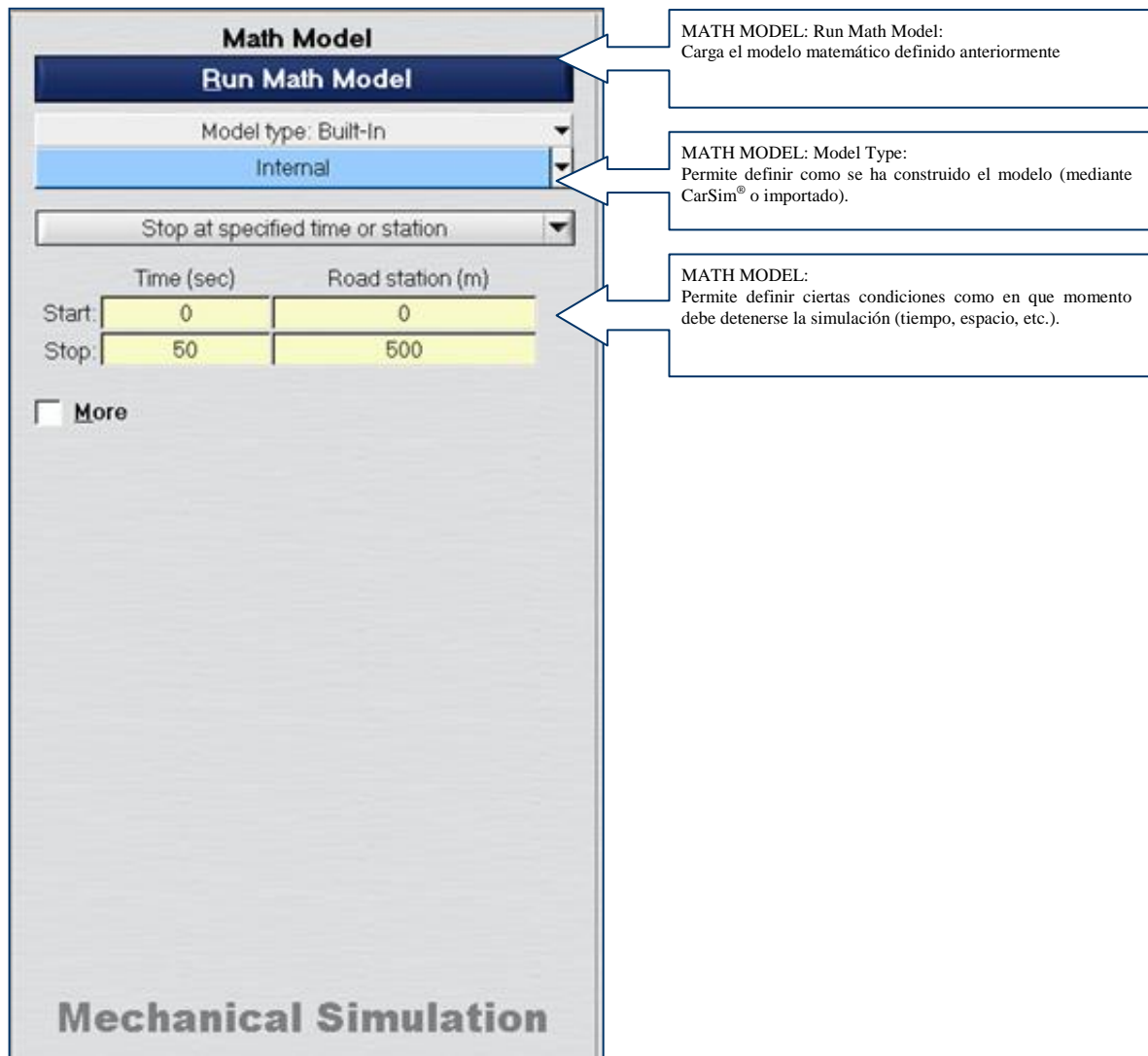


Figura 32: Detalle del tercio central de la pantalla de control general.

3.-Parte derecha “RESULTS”: Esta parte muestra los resultados obtenidos, tanto la animación de la simulación como los gráficos obtenidos a partir de la misma. También permite ciertas opciones como superponer varias simulaciones y cambiar algunas características de la animación.

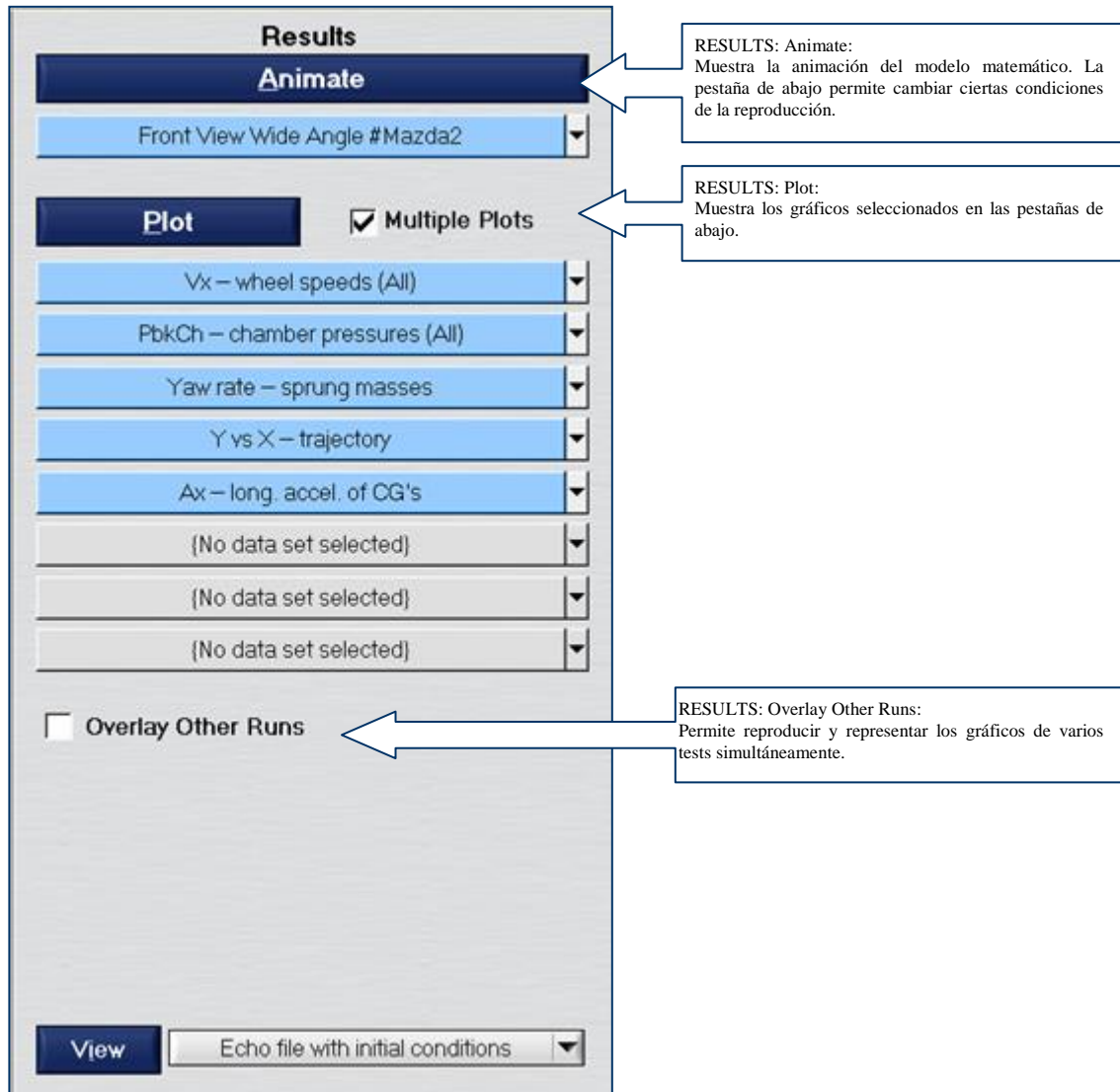


Figura 33: Detalle del tercio derecho de la pantalla de control general.

4.2 VEHICULO DE ENSAYO Y NEUMÁTICOS

El vehículo que se ha utilizado para el ensayo se trata de un todoterreno, de marca Nissan Pathfinder 2.5 dCi de 5 plazas con la siguiente nomenclatura de neumáticos: 255/65 R17.

La elección que se ha realizado de este vehículo ha sido, porque de entre todos los modelos ya preestablecidos del CarSim[®], el Nissan tiene unas medidas bastantes parecidas y los cambios que se tienen que hacer son mínimos, por lo que se pueden usar por defecto muchos de los parámetros que ya tiene preestablecidos el programa.

A continuación, se muestra un esquema básico del modelo a estudiar con las principales cotas.

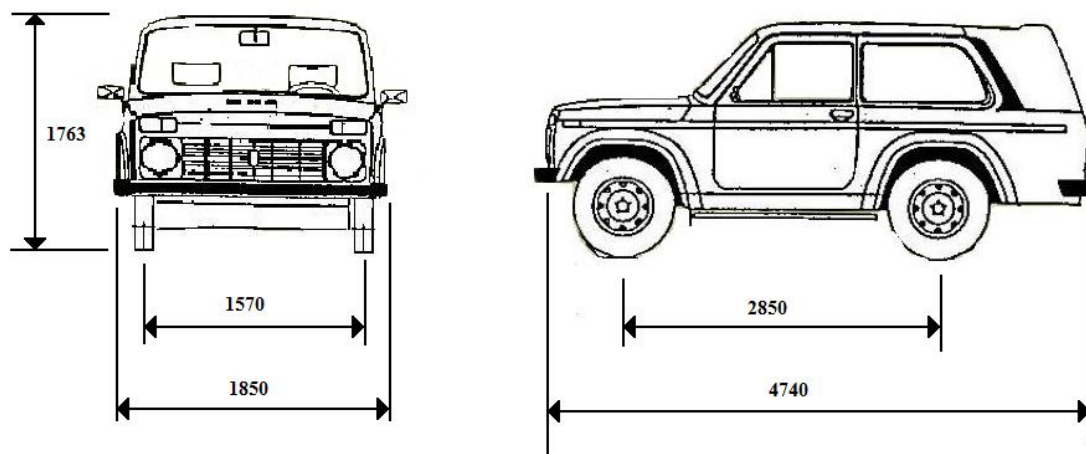


Figura 34: Esquema del vehículo Nissan Pathfinder

No obstante, aunque el CarSim[®], tiene ya bastantes valores preestablecidos, se necesitan introducir las variables concretas del modelo.

En la siguiente tabla se puede ver esos valores fundamentales para el estudio, así como los característicos de este tipo de vehículos todo terreno. Todos ellos obtenidos desde las especificaciones del fabricante

Prestaciones y consumo homologados	
Velocidad máxima (km/h)	175
Aceleración 0-100 km/h (s)	12,3
Consumo urbano (l/100 km)	11,5
Consumo extraurbano (l/100 km)	7,6
Consumo medio (l/100 km)	9
Emisiones de CO ₂ (gr/km)	238



Dimensiones, peso, capacidades	
Tipo Carrocería	Todo terreno
Número de puertas	5
Largo / ancho / alto (mm)	4740 / 1850 / 1763
Batalla / vía delantera - trasera (mm)	2850 / 1620 - 1620
Coeficiente Cx	0,38
Peso (kg)	2210
Volumen del depósito de combustible (l)	80
Volumen del maletero (l)	515

Cotas de todo terreno	
Ángulo de entrada (grados)	33
Ángulo de salida (grados)	26
Altura libre (mm)	254
Altura de vadeo (mm)	450

Motor	
Combustible	gasóleo
Potencia máxima CV - kW / rpm	174 - 128 / 4000
Par máximo Nm / rpm	403 / 2000
Número de cilindros	4 en línea
Diámetro x carrera (mm)	89 x 100
Cilindrada (cm3)	2488
Relación de compresión	16,5

Transmisión	
Tracción	total
Caja de cambios	Manual , seis velocidades

Chasis	
Suspensión delantera	Independiente. Paralelogramo deformable.
Suspensión trasera	Independiente. Paralelogramo deformable.
Frenos delanteros (diámetro mm)	disco ventilado (320 mm)
Frenos traseros (diámetro mm)	disco ventilado (308 mm)
Tipo de dirección	de cremallera
Neumáticos	255/65 R17
Llantas	7,0 x 17

Tabla 4: Ficha técnica del vehículo

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: [CMR05], [CQS05], [WWWKM7], [WWWNIS] y [WWWCAR]

5 ANALISIS Y RESULTADOS

5.1 DATOS PRELIMINALES

En este apartado se podrán ver las simulaciones que se han llevado a cabo mediante el programa de simulación CarSim®.

Lo primero que se ha hecho ha sido seleccionar de la biblioteca que ofrece CarSim® el modelo que previamente, mediante una visualización de los ofertados, se vio cual se asemejaba mas al vehículo real de ensayo; el Nissan Pathfinder 2.5 dCi. Sería un “SUV, big”, es decir, un todoterreno de gran tamaño. Como se ve en la siguiente imagen, tanto el modelo real, el esquema y el utilizado por el CarSim® son semejantes.



Figura 35: Comparativa del vehículo real, esquematiza y utilizado por CarSim®

En principio, muchos de los datos que vienen predefinidos por el CarSim®, van a ser los utilizados para el estudio, pero para que el escrito sea realmente válido y sea lo más real posible, se van a introducir los datos propios del vehículo en el apartado apropiado. Principalmente se variarán algunas cotas del vehículo y su peso exacto para conseguir el análisis dinámico deseado, y que al final los datos sean lo más realistas posibles.

Las cotas que se han introducido vienen recuadradas en verde, de esta manera se verá que las medidas introducidas son mínimas, respecto al total de parámetros que maneja el CarSim®, y que realmente, ambos vehículos (ensayado y real), son realmente parecidos.

En primer lugar, se van a introducir las cotas y el peso propio del vehículo que se pudieron ver en la tabla 4 obtenidas del fabricante.

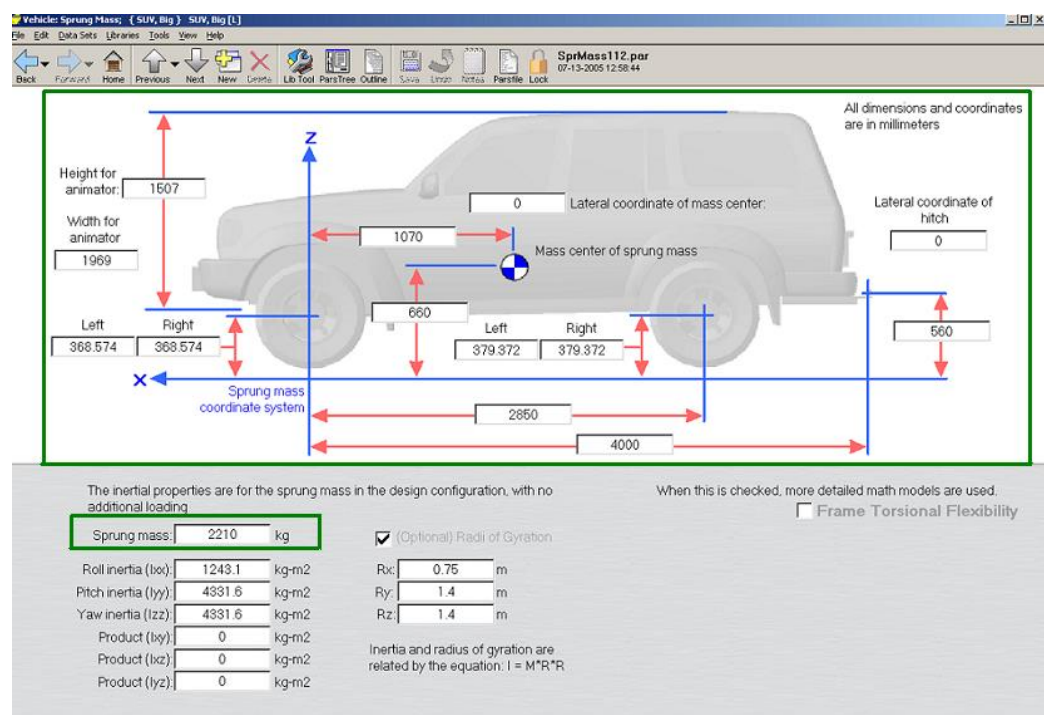


Figura 36: datos de las dimensiones del vehículo y su peso

A continuación, se va a introducir tanto la vía delantera del vehículo (ver figura 37) y el área frontal del vehículo para el completo análisis dinámico (ver figura 38).

Suspension: Independent System Kinematics: { Front } Big SUV - Front Suspension /irene/toes4 [L]

File Edit Data Sets Libraries Tools View Help

Back Forward Home Previous Next New Create Lib Tool ParaTree Outline Save Undo Refresh ParseFile Lock

IndKin159.par 05-28-2007 11:47:25

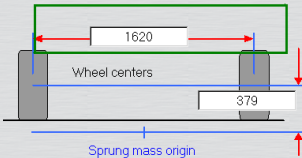
Mass and Inertia

Unsprung mass (both sides): 120 kg

Spin inertia for each wheel:

Left	Right
1.1	1.1

kg-m²



Wheel centers: 1620 mm

Sprung mass origin: 379 mm

Dimensions are in millimeters

Lateral coordinate of suspension center: 0 mm

Note:
No roll center location is specified because the location and movement of the roll center are implied by the kinematic data.

Static Alignment Settings

Left	Right
Camber: 0	Camber: 0
Toe: 4	Toe: 4

deg

Kinematics Based on Jounce

Specify jounce at design load: Left 0 Right 0 mm

Wheel Dive Movement Due to Jounce

Left wheel dive (caster change): Dive table	Right wheel dive (caster change): Dive table
No Caster Change	No Caster Change

Left wheel X: Longitudinal Movement	Right wheel X: Longitudinal Movement
Front Wheel Longitudinal (R = 0.077)	Front Wheel Longitudinal (R = 0.077)

Wheel Roll Movement Due to Jounce

Left wheel camber: Camber	Right wheel camber: Camber
Example Front Camber	Example Front Camber

Left wheel lateral (-Y): Lateral Movement	Right wheel lateral (+Y): Lateral Movement
Big SUV Front Track Change	Big SUV Front Track Change

Toe (Steer) Due to Jounce

Left wheel toe: Toe	Right wheel toe: Toe
Example Front Toe	Example Front Toe

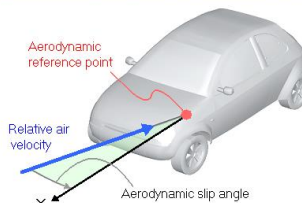
Figura 37: Datos de vía del vehículo introducidos

Aerodynamics: Main Screen: Big SUV [L]

File Edit Data Sets Libraries Tools View Help

Back Forward Home Previous Next New Create Lib Tool ParaTree Outline Save Undo Refresh ParseFile Lock

Aero108.par 07-13-2005 13:04:52



Aerodynamic reference point

Relative air velocity

Aerodynamic slip angle

Aerodynamic Reference Point

X:	-1500	mm
Y:	0	mm
Z:	0	mm

Aerodynamic Coefficients (Functions of Beta)

Long. force: Drag vs aero slip	CFx
Lateral force: Aero side force vs aero slip	CFy
Vertical force: Lift vs aero slip	CFz
Roll moment: Aero Mx vs aero slip	CMx
Pitch moment: Aero My vs aero slip	CMy
Yaw moment: Aero Mz vs aero slip	CMz

Frontal area and Reference length

Frontal area A:	2.4	m ²
Reference length L:	2850	mm

Aerodynamic effects are represented by a force vector and a moment vector acting on the sprung mass. The force vector is applied at the aerodynamic reference point, defined by coordinates in the sprung-mass coordinate system.

The components of the force and moment in the body-fixed sprung mass frame are calculated as functions of the aerodynamic side slip angle Beta:

$$F_x = -C_Fx(\beta) \cdot A \cdot Q$$

$$F_y = -C_Fy(\beta) \cdot A \cdot Q$$

$$F_z = C_Fz(\beta) \cdot A \cdot Q$$

$$M_x = -C_Mx(\beta) \cdot A \cdot L \cdot Q$$

$$M_y = -C_My(\beta) \cdot A \cdot L \cdot Q$$

$$M_z = -C_Mz(\beta) \cdot A \cdot L \cdot Q$$

$$Q = \frac{1}{2} \rho V^2$$

where ρ = air density, V = relative air speed, A = frontal cross-section area, L = aerodynamic reference length. The coefficients C_Fx , C_Fy , etc. are dimensionless coefficients defined as tabular functions of Beta.

Figura 38: Datos del área frontal y batalla introducidos

Otro de los datos que son fundamentales para el estudio dinámico del automóvil, son los referentes a los neumáticos.

Los neumáticos que lleva el Nissan Pathfinder son 255/65 R17, pero dentro de la biblioteca del CarSim®, esta posibilidad no viene predeterminada, por lo que se ha optado por utilizar el modelo más parecido de los que se ofrecen, en el caso de estudio, se montará en el simulador unos neumáticos con las características siguientes: 277/70R16.

Además, se modificará el valor del radio bajo carga poniendo el correspondiente al neumático que usa el vehículo verdadero.

En el caso que ocupa, el radio bajo carga es de 398mm. En la siguiente figura 39, se puede ver el dato introducido en el CarSim®, con su detalle para una mejor apreciación.

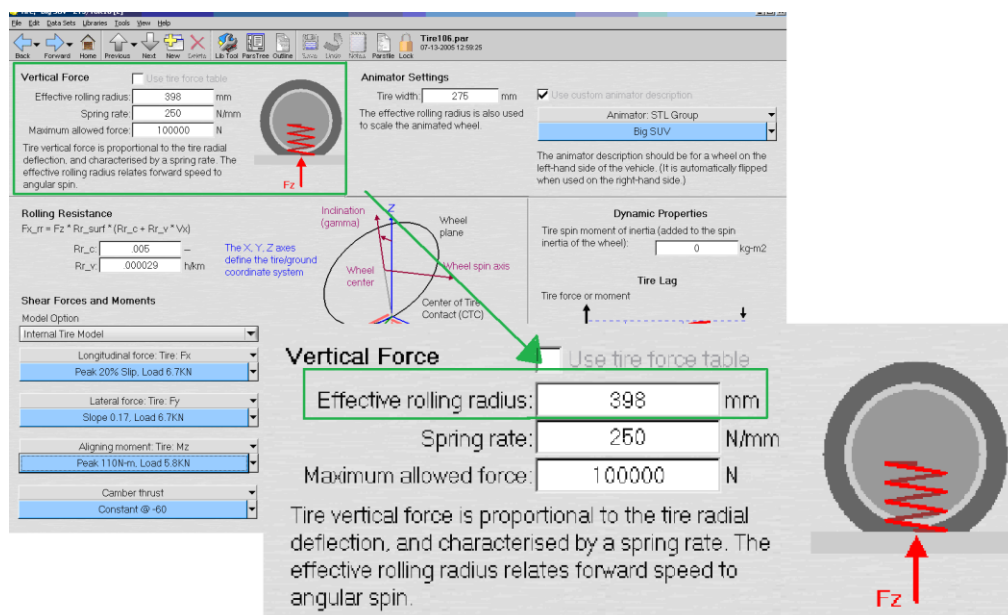


Figura 39: Datos del radio baja carga introducido

Una vez que ya se han introducidos los datos referentes a cotas y a peso, es decir, los datos característicos del vehículo a estudiar, éstos se mantendrán constantes a lo largo de todas las simulaciones pues no variarán.

A continuación, se pasará a ver cada una de las simulaciones realizadas, pudiendo ver en cada uno de los ensayos, los datos que son característicos del mismo y por tanto, se han de modificar y después, un análisis de resultados obtenidos de cada una de ellas.

5.2 ENSAYO A RADIO CONSTANTE

El primer ensayo que se ha realizado ha sido el de radio constante, en el cual, se hará circular el vehículo en una curva de radio constante. Se han utilizado dos curvas de radio diferente, 100 y 200 m y a 6 velocidades diferentes. Además, como ya se comentó en objetivos, se variará el ángulo de convergencia de las ruedas de 0 a 4.

La finalidad de este primer ensayo, es representar en una curva la aceleración lateral frente al ángulo de dirección y observar si el vehículo varía su comportamiento direccional o por el contrario se muestra constante a lo largo de la curva.

Aquí se muestra un resumen de todas las simulaciones realizadas para el ensayo de radio constante:

ENSAYO PARA RADIO CONSTANTE	
R=100m	R=200m
v=30 km/h	v=30 km/h
v=50 km/h	v=50 km/h
v=70 km/h	v=70 km/h
v=90 km/h	v=90 km/h
v=110 km/h	v=110 km/h
v=130 km/h	v=130 km/h

Tabla 5: Simulaciones realizadas para ensayo de radio constante

5.2.1 Parámetros de la simulación

A continuación, se verá, después de introducir los datos afines a todos los ensayos en el apartado 4.1 datos preliminares, cual son los datos que se necesitan exclusivamente para llevar a cabo este primer ensayo.

En primer lugar, se debe seleccionar la trayectoria que se requiere que realice el vehículo de ensayo. En la propia biblioteca del CarSim® no se encuentra la trayectoria que se necesita por lo cual se pasará a crear. Se puede ver a continuación en detalle como está creada esta curva para el radio requerido.

Para crear esta curva, se usará la ecuación de la recta $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$. Además se sabe que el centro de circunferencia está situado en (0,100) y que el radio es de 100.

Para una mayor comodidad y rapidez, se irán dando valores fijos a la x de 10 en 10 con el fin de conseguir valores de y.

En la siguiente figura se muestra la curva obtenida y con los valores de x,y correspondientes. Como se puede observar, dando valores de x de 10 en 10, da como resultado una curva muy fiable y cercana a la circunferencia deseada.

Se procederá de igual manera a la hora de obtener la curva de radio 200m

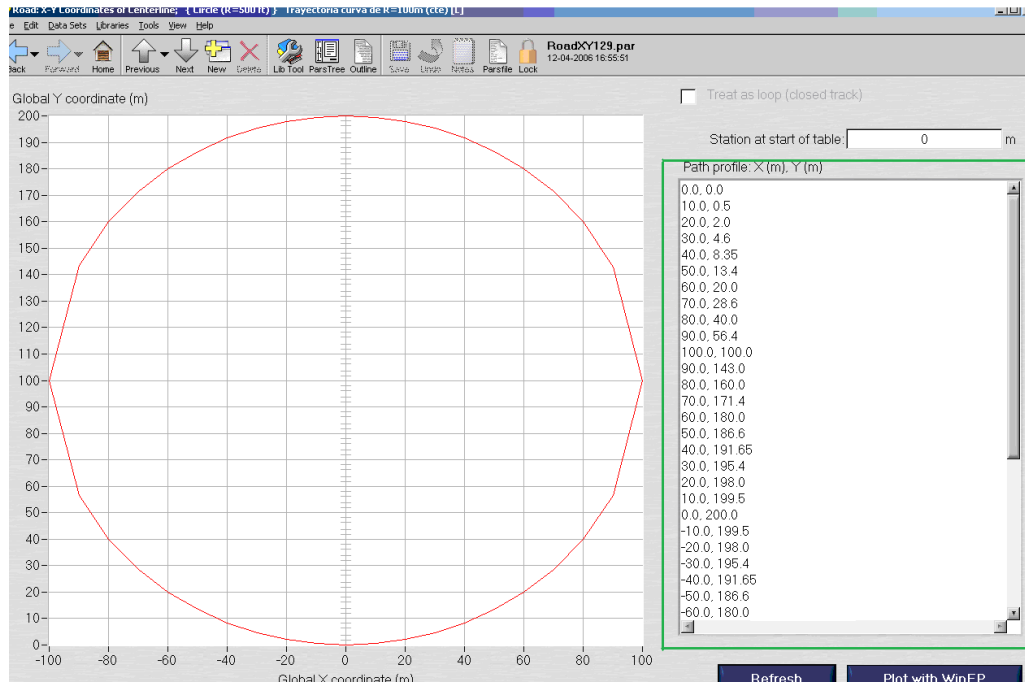


Figura 40: Definición de la trayectoria de la curva ensayada.

Otro parámetro que se debe introducir para este ensayo, es la velocidad, que será constante para cada uno de ellos. Este dato se introducirá en la pantalla inicial, en lo que en el capítulo 3 (materiales y métodos) del presente documento, se llamó control general. Además, se tienen que definir los parámetros del ensayo, es decir, se definirá el ensayo por tiempo de duración y por distancia recorrida, parándose, en cuanto se llegue a uno de estos dos valores. Estos valores serán definidos en el eje central del control general, en el “math model”. Y por último, se debe de introducir los datos que se quieren obtener. Los fundamentales son la aceleración lateral y el ángulo de dirección.

Para lograr una correcta visualización de donde introducir estos últimos parámetros, se recurrirá a la ayuda visual de la figura 41, donde se puede ver recuadrados en color verde los valores que van a ser necesarios para este ensayo.

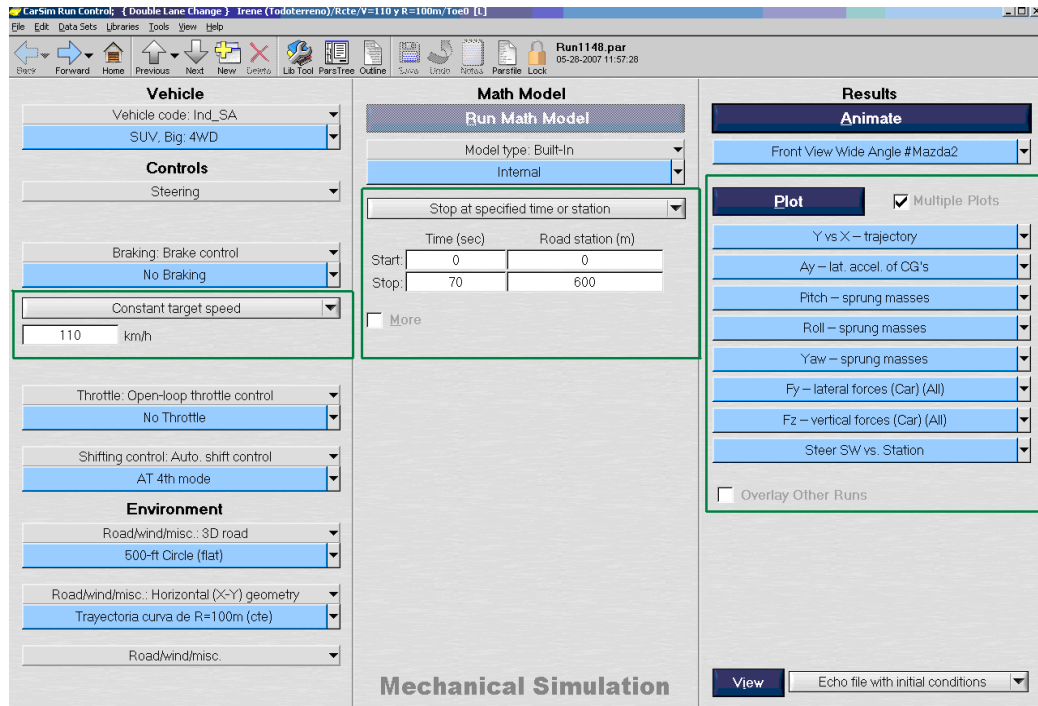


Figura 41: Introducción de datos propios del ensayo.

5.2.2 Análisis de los resultados obtenidos

Las gráficas que se han obtenido han sido: trayectoria seguida respecto a los ejes x,y, aceleración lateral respecto al centro de gravedad, momento de balanceo, guiñada y cabeceo, fuerza lateral y vertical en los neumáticos y ángulo de dirección.

Para el presente estudio, las gráficas que serán de interés serán las de aceleración lateral y la gráfica que se corresponde con el ángulo de dirección del vehículo. Realizando un primer estudio, se ve que todas ellas siguen un mismo patrón y en principio muestran el mismo comportamiento; comienzan con unas grandes variaciones, hasta que el vehículo consigue llegar a la velocidad fijada de antemano (se recuerda que en este ensayo, se marca la velocidad a la cual se quiere que circule por la curva), y desde ese punto se muestra estacionario y oscilarán en torno a ese valor intermedio. De forma más visual se pueden ver en las siguientes figuras.

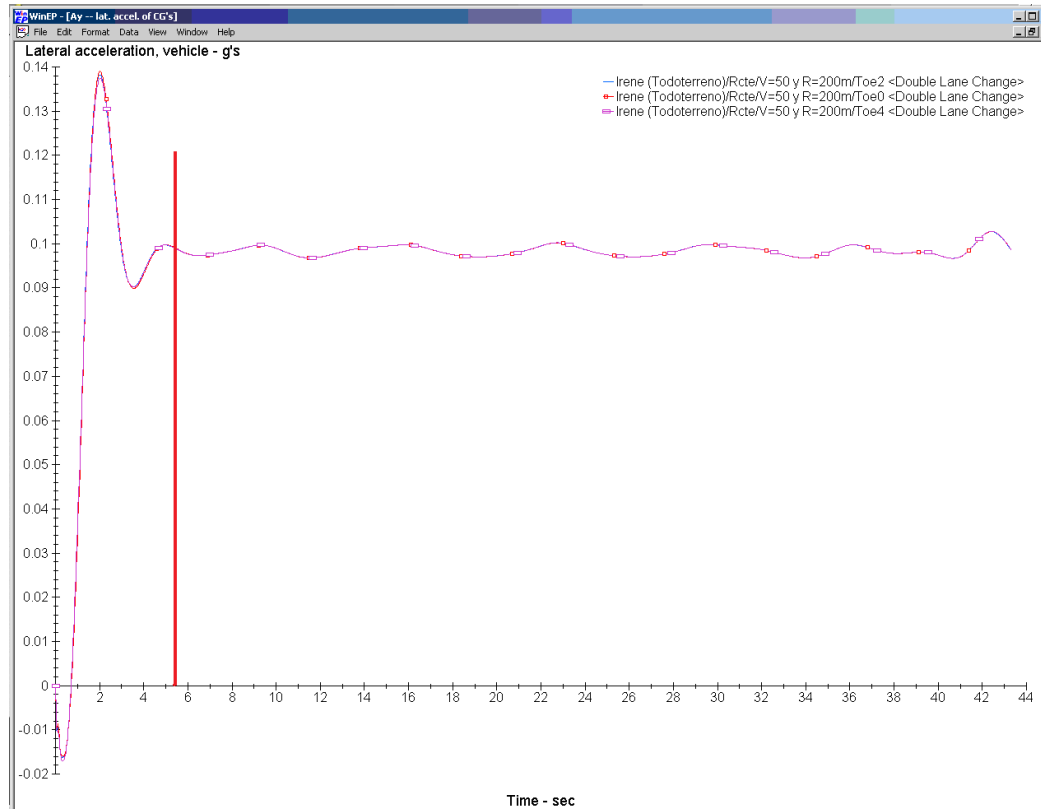


Figura 42: Aceleración lateral para radio de 200m y velocidad de 50km/h

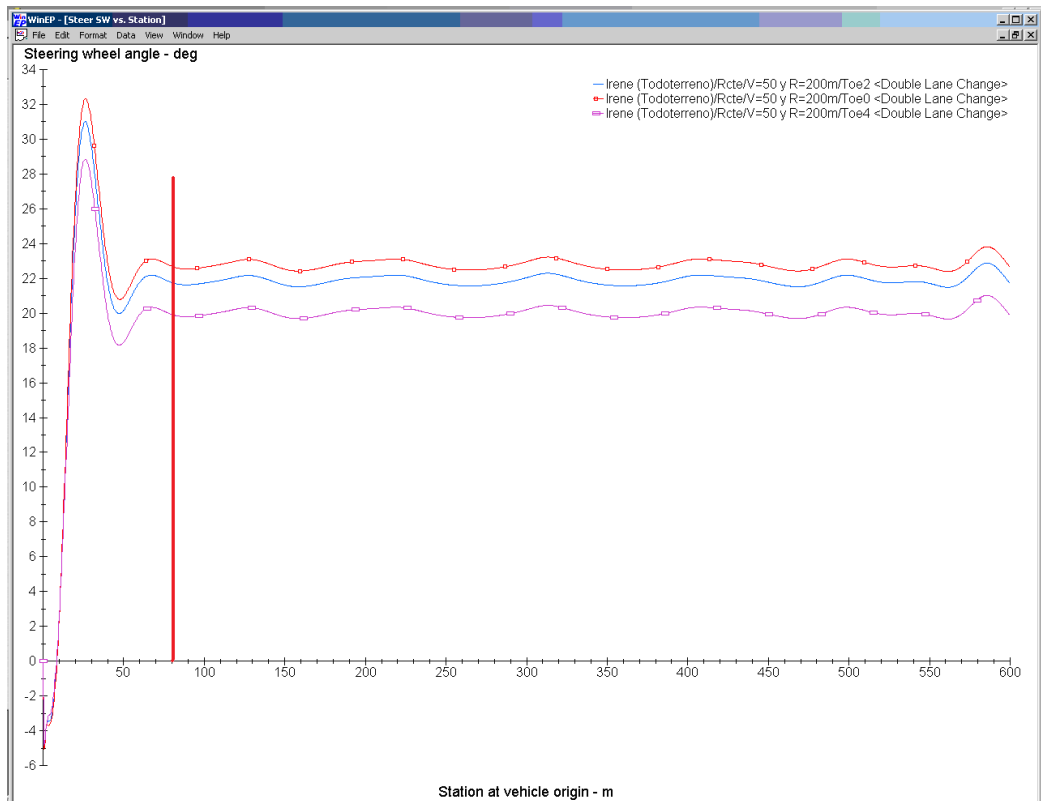


Figura 43: Ángulo de dirección para radio de 200m y velocidad de 50km/h



Para un mejor análisis de los datos, se ha dibujado una línea roja vertical, la cual separa el estado transitorio del estacionario. La finalidad de separar ambos estados, es que se necesita obtener de cada una de las curvas tan sólo un dato que se corresponda con el valor medio que muestra, tanto la aceleración como en ángulo de dirección ya en estado transitorio.

Obtenido ya el valor medio que se necesita para el ensayo, se procede a recordar del apartado 2.4.2.1., como se obtenía la ecuación del coeficiente del viraje:

$$\delta = \frac{L}{R} + K_v \cdot \frac{V^2}{g \cdot R}$$

Derivando esta ecuación se obtiene:

$$\partial(\delta) = \partial\left(\frac{L}{R} + K_v \cdot \frac{V^2}{g \cdot R}\right) \Rightarrow \partial\delta = K_v \cdot \partial\left(\frac{V^2}{g \cdot R}\right) \Rightarrow K_v = \frac{\partial\delta}{\partial\left(\frac{V^2}{g \cdot R}\right)} \Rightarrow K_v = \frac{\partial\delta}{\partial a_y}$$

Esta ecuación última, muestra que si se representa en la curva, la aceleración lateral frente a la variación de ángulo, dará como resultado el coeficiente de viraje. Y ya con este valor, se puede estudiar el comportamiento direccional del vehículo.

A continuación, se muestran las tablas con los resultados obtenidos para las simulaciones de circulación en curva con los radios de 100 y 200.

ENSAYO A RADIO CONSTANTE R=100M						
	Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°	
	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)
V=30Km/h	0,0693	30	0,0693	30	0,0694	29
V=50Km/h	0,1977	45	0,1976	43	0,1976	41
V=70Km/h	0,3846	59	0,3853	54	0,3854	52
V=90Km/h	0,6234	113	0,6406	87	0,6752	360
V=110Km/h	0,7530	360	0,7910	360	0,9065	360
V=130Km/h						

Tabla 6: Ensayo de radio constante, con R=100

ENSAYO A RADIO CONSTANTE R=200M						
	Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°	
	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)
V=30Km/h	0,052597	17	0,05247	17	0,052481	16
V=50Km/h	0,099765	22	0,09972	21	0,099727	19
V=70Km/h	0,194607	30	0,19454	28	0,194605	26
V=90Km/h	0,323115	39	0,32264	35	0,322657	31
V=110Km/h	0,480873	51	0,48024	44	0,48057	70
V=130Km/h						

Tabla 7: Ensayo de radio constante, con R=200

Lo primero que se puede observar en ambas tablas, llamando bastante la atención, son ciertos valores. En la primera tabla para valores de radio igual a 100m, se ve que para la velocidad de 110km/h en grado de divergencia 0, 2 y 4, y también para divergencia 4 y velocidad 90km/h, el dato obtenido para el ángulo de convergencia es de 360°. Esto significa que el vehículo, al circular a altas velocidades, no es capaz de realizar de forma correcta la curva, por lo que aparecen efectos de deslizamientos tales, que el vehículo deja de responder a las indicaciones marcadas por la dirección del volante.

De igual manera sucede para el radio de 200m. Estos efectos, al ser el radio mayor que el ensayo anterior, tardan más en aparecer y se puede llegar a realizar los ensayos con todos los ángulos hasta llegar a la velocidad de 110km/h. Pero al alcanzar a la velocidad de 130km/h, no se pueden recoger datos para el automóvil pues éste ha dejado de seguir la trayectoria que inicialmente se había marcado.

Para ver mas claramente a que se está refiriendo con “aparecen efectos de deslizamiento y no es posible recoger datos”, se pueden observar las siguientes gráficas de aceleración y ángulo de dirección, para un grado de divergencia de 0°, circulando en la curva de 200m a la velocidad de 130km/h.

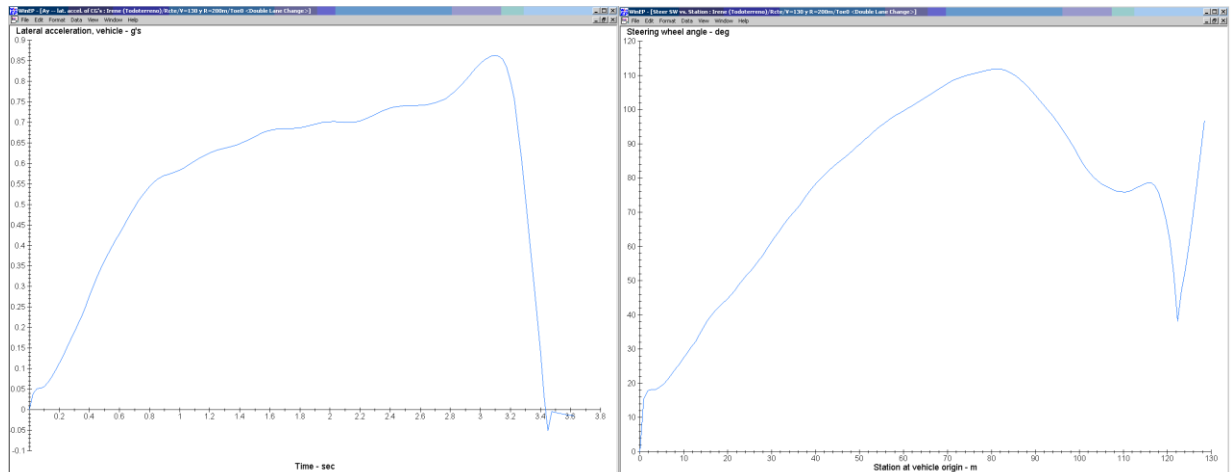


Figura 44: Aceleración lateral y ángulo de dirección, para velocidad 130km/h, grado divergencia 0° y radio de curvatura 200m

Como se ha comentado al comienzo de este primer ensayo, el patrón que debería observarse en cada gráfica es el de una recta con un comienzo sinuoso (estado transitorio) que da paso a un estado mas o menos lineal (estado estacionario), donde se obtienen las medidas necesarias.

Comparando estas gráficas con las primeras se ve que esto no sucede. El estado transitorio perdura en la totalidad del ensayo hasta que finalmente llega a cero (gráfica de aceleración lateral) o tiende a infinito (gráfica de ángulo de dirección). Por lo que el estudio para velocidades de 130km/h no tiene sentido viendo que el vehículo deja de comportarse de forma segura.

Con el resto de datos, que sí son fiables y útiles, se pasa a realizar las curvas correspondientes de ángulo de dirección frente a aceleración lateral, para ver de forma visual el comportamiento direccional en cada uno de los ensayos de radio diferente.

Se comenzará el estudio por el ensayo de radio constante igual a 100m.

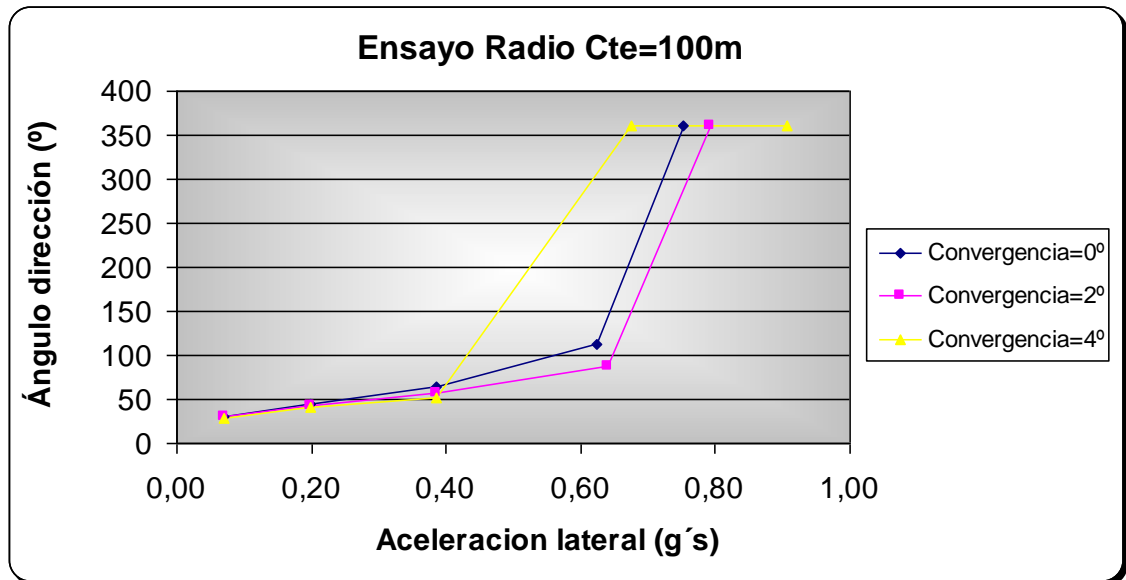


Figura 45: Grafica ensayo radio constante 100m

Aun quitando ciertos datos de velocidades altas, las correspondientes a 130km/h, los datos no son del todo representativos, pues como se vio en la primera tabla, para ciertos algunos ángulos de convergencia, los ángulos de aceleración lateral tenían valor de 360°, es decir, el vehículo no realiza la trayectoria marcada (el radio de la curva no es lo suficientemente grande) y sufre efectos de deslizamiento.

Se puede concluir con estos primeros datos que, el vehículo de estudio no puede realizar curvas de radio igual a 100m con velocidades igual o mayores a 110Km/h, incluso con ángulo de convergencia de 4° no se puede realizar con velocidades mayores a 90Km/h, pues no se tendría el control sobre la dirección.

Visto que sucede a altas velocidades, se va a proceder a retirar esos datos pues no son útiles para el estudio que se está llevando a cabo, sólo es de interés la parte donde se tiene el control direccional y ver cual es el comportamiento direccional que presenta.

Por lo que se realizará el estudio final para radio igual a 100m, con velocidades de hasta 90Km/h para ángulo de convergencia igual a 0° y 2°, y con velocidad de hasta 70Km/h con ángulo de convergencia igual a 4°.

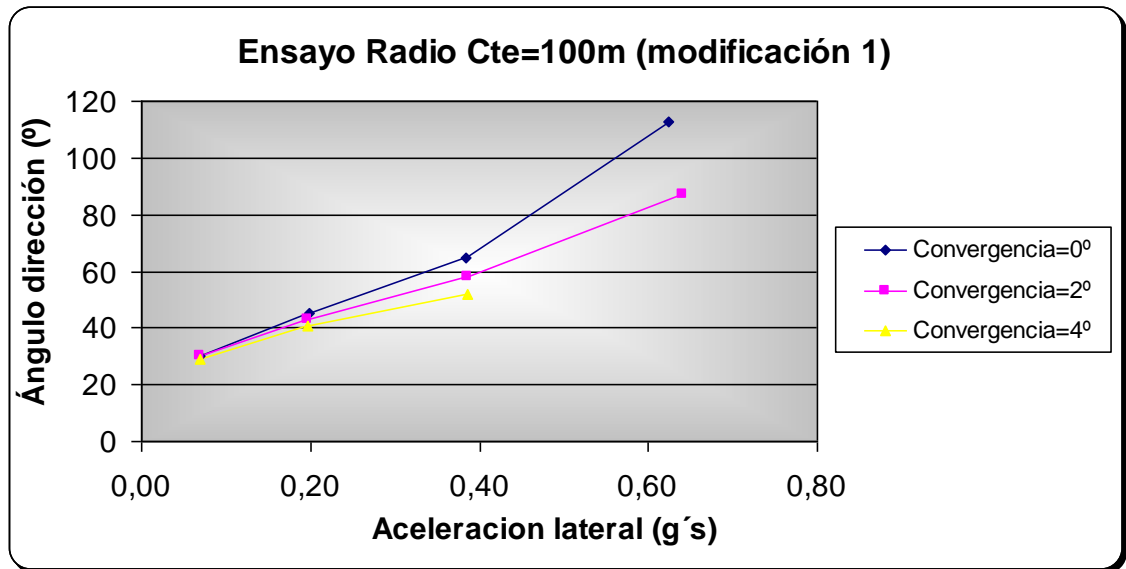


Figura 46: Grafica ensayo radio constante 100m (modificación 1)

Seguidamente, se pasará a estudiar la evolución de las pendientes de las curvas. Como se ha dicho anteriormente, la pendiente representa el coeficiente de viraje KV y da la información del comportamiento direccional del vehículo. En el caso descrito, la pendiente es positiva, $KV > 0$, lo que significa que el vehículo tiene un carácter subvirador. Además, también se puede apreciar, que según se incrementa el tiempo del ensayo, la pendiente se va haciendo mayor, aceptuando el carácter virador del vehículo.

Si ahora se presta atención a la influencia de la convergencia, se ve claramente que a bajas velocidades las tres curvas guardan un gran parecido y es tan sólo, cuando la velocidad y la aceleración crecen, la convergencia ejerce influencia. Es decir, a bajas velocidades el comportamiento direccional no se ve influenciado por el grado de divergencia. A partir de un punto común para las tres curvas, este comportamiento varía y como se ha comentado anteriormente, el carácter subvirador crece de forma gradual. Este punto coincide con $V_{100r} = 70 \text{ km/h}$. En este instante, las tres curvas no siguen la misma tendencia y la curva de convergencia 0° , muestran un carácter subvirador mayor (su pendiente es mayor) que las de 2° y 4° , cuya pendiente es más suave.

Ahora se pasará a estudiar el ensayo para radio 200m.

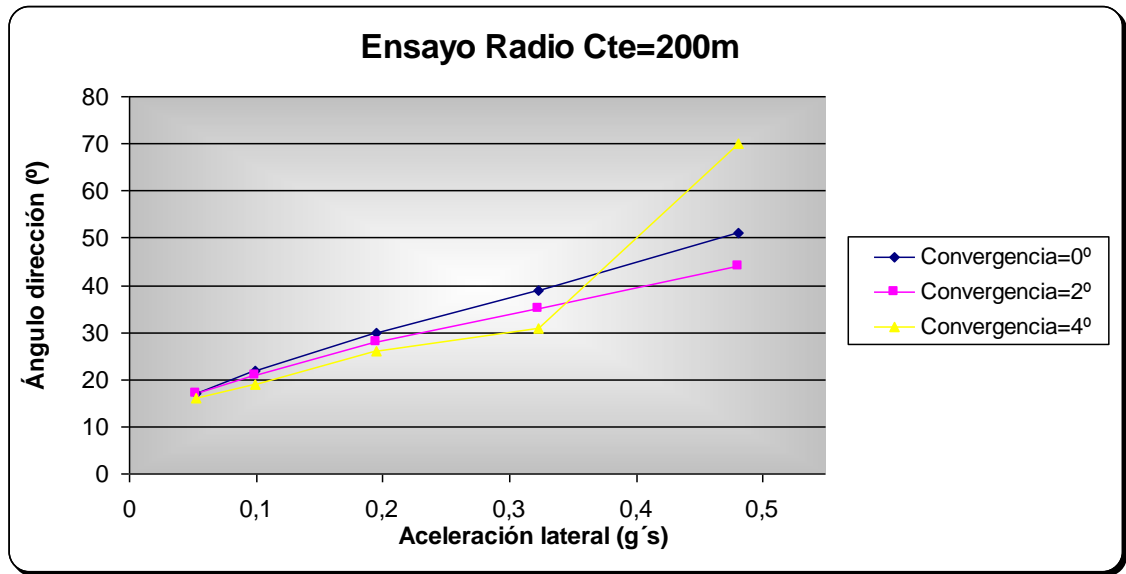


Figura 47: Grafica ensayo radio constante 200m

En este nuevo ensayo de radio igual a 200 metros, se pueden ver varios de los fenómenos ya estudiados en el caso anterior de radio igual a 100 metros. Una de las características principales es que todas las curvas tienen pendiente positiva, por lo que de nuevo se estará hablando de un carácter subvirador en el vehículo ensayado.

La tendencia similar a bajas velocidades se puede apreciar que de igual manera también se mantiene, incrementándose de nuevo para un punto. En este caso, se está hablando de un radio mayor, lo que deja al vehículo más margen de maniobra y que los movimientos de la dirección no sean tan bruscos y rápidos, por lo que el punto en el cual la pendiente crece más rápidamente, sea un punto de mayor velocidad que en el anterior ensayo, pasando de ser el punto donde la tendencia cambia de $V_{100r}=70\text{km/h}$ a $V_{200r}=90\text{km/h}$.

En este ensayo es reseñable el comportamiento de la curva de 4°, la línea de color amarillo. Al estar realizando curvas de gran radio, 200 metros, todos los efectos que se veían en la anterior curva de 100 metros se ven suavizados. Por lo que se aprecia, que en la práctica se podría circular con este modelo de todoterreno, en las mismas condiciones que en el ensayo tanto de curvatura como de grado de divergencia de los neumáticos, hasta llegar a una velocidad de 90Km/h, sin que aparezcan efectos de deslizamiento severos que afecten a la seguridad.

Por otro lado, estudiando mas de cerca las curvas de convergencia de grados 0 y 2, ambas tienen un comportamiento muy similar. Solamente a partir de una velocidad marcada de 90Km/h (el punto mas conflictivo en las curvas), se ve un ligero distanciamiento en la pendiente. La curva de



grado 0 crece un poco mas rápidamente que la curva de 2. Lo que significa que el carácter subvirador del vehículo será ligeramente mayor en la curva de 0°.

Comparando a grandes rasgos los dos ensayos con sus diferentes radios se puede observar, que para una misma velocidad (velocidades medias – altas) y un mismo grado de divergencia de los neumáticos, el comportamiento que muestra el vehículo está más marcado por el propio radio de la curva que por las condiciones del vehículo. A velocidad de 90Km/h, con cualquier grado de divergencia, tan sólo se podría realizar la curva de 200 metros de radio, no de radio 100.

Esto en la vida real es impensable, no se puede escoger que radios de curvatura en las carreteras queremos realizar y cuales no. Por lo que como no podemos influir en el radio de curvatura de la carretera, debemos de influir en el ángulo de convergencia con el que el vehículo sale de fábrica. Todo con un único fin, mantener el control del vehículo lo mejor posible y evitar a toda costa los efectos de deslizamiento.

En resumen, en este ensayo se ha visto que la influencia del radio es el factor mas destacado, pero al ser algo que en la vida real no se puede variar, con lo que se debe de trabajar es realmente con el radio de convergencia.

El grado de divergencia 4 queda completamente descartado, ya que no se puede garantizar una conducción segura ni siquiera a bajas – medias velocidades.

Ya comparando entre el ángulo de 0 y de 2, ambas tenían un comportamiento parecido, pero las curvas de grado 2 mostraban una pendiente mucho mas suave, por lo que este ángulo ofrecerá al conductor mayor seguridad y estabilidad.

5.3 ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE

En este segundo ensayo, lo que se busca es efectuar los giros correspondientes a velocidad constante. Igualmente se representará la aceleración lateral que sufre el vehículo frente al ángulo de dirección, para posteriormente conocer el comportamiento direccional que tiene el automóvil. Los ensayos que se han realizado esta vez, vienen de nuevo resumido en una tabla.

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE	
$\Delta \delta = 1,5^\circ/\text{s}$	$\Delta \delta = 10^\circ/\text{s}$
$v=30 \text{ km/h}$	$v=30 \text{ km/h}$
$v=50 \text{ km/h}$	$v=50 \text{ km/h}$
$v=70 \text{ km/h}$	$v=70 \text{ km/h}$
$v=90 \text{ km/h}$	$v=90 \text{ km/h}$
$v=110 \text{ km/h}$	$v=110 \text{ km/h}$
$v=130 \text{ km/h}$	$v=130 \text{ km/h}$

Tabla 8: Simulaciones realizadas para ensayo de velocidad constante

5.3.1 Parámetros de la simulación

Durante este ensayo no se fijará una trayectoria predefinida, sino que se dejará que el vehículo circule en la curvatura que se requiera, trayectoria libre, hasta que realice una curva al completo.

Para diferencia este ensayo del siguiente, ángulo de dirección constante, se van a realizar incrementos graduales por segundo del volante, que variarán entre 1,5 y 10, dependiendo del estado que se esté realizando.

El resto de parámetros se van a mantener constantes respecto a los ya introducidos en el primer ensayo de radio constante.

Por lo que para cada una de las pruebas de este ensayo, se fijará una velocidad constante y unos incrementos de ángulo de dirección.

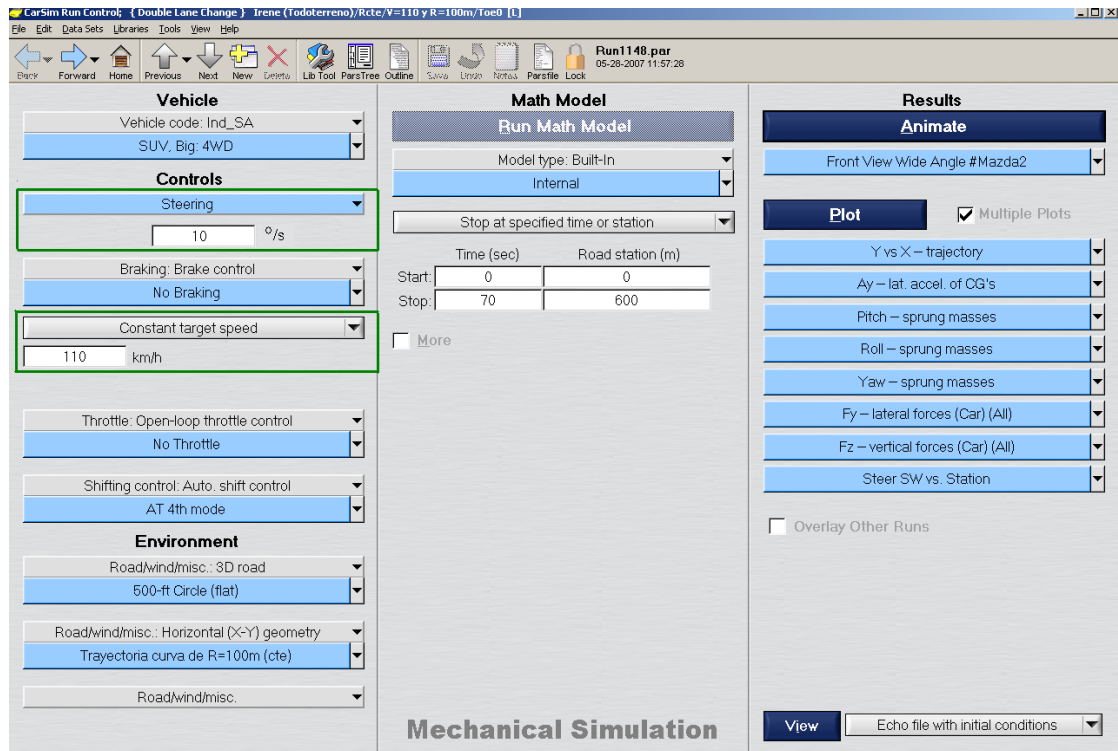


Figura 48: Introducción de datos propios del ensayo de velocidad constante

5.3.2 Análisis de los resultados obtenidos

Para el correcto análisis de los resultados de este ensayo, se tiene que tener en cuenta que las gráficas que representan la aceleración lateral, no sufren un estacionamiento como en el primer ensayo, sino que en cada una de ellas hay muchos datos que hay que tratar de formar correcta para interpretar los resultados.

A continuación se verá, como modelo ejemplo, las gráficas del ensayo para velocidad 70km/h y con incremento de ángulo de 1,5°/s para ver como se han tratado los datos.

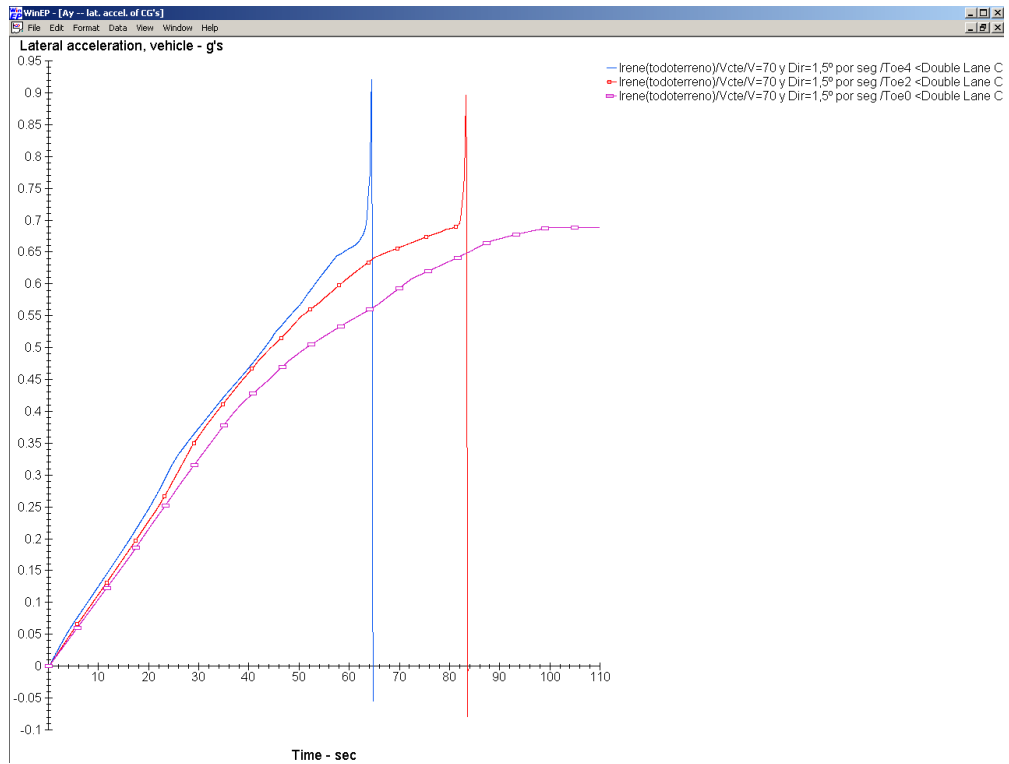


Figura 49: Aceleración lateral para ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de 1,5/s

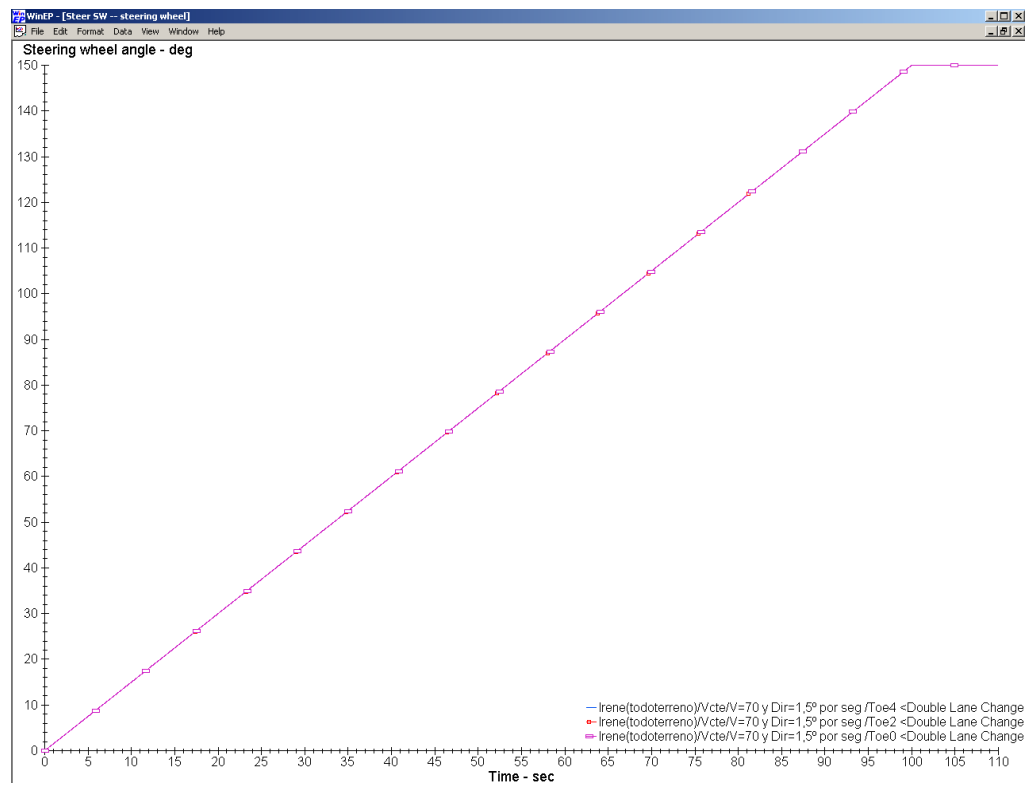


Figura 50: Ángulo de dirección para ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de 1,5/s



Como anteriormente se ha comentado, las gráficas de aceleración lateral no sufren un estacionamiento. Crecen durante todo el ensayo, hasta que llegan a un punto que el vehículo pierde la estabilidad y se pierde el control sobre él (representado en la figura como la caída a 0, después de pasar una subida exponencial).

Así mismo, se ve que las curvas del ángulo de dirección son iguales para los tres grados de convergencia estudiada ya que el incremento es el mismo para el trío y la curva siempre tendrá la misma forma; siempre y cuando se esté hablando del mismo incremento.

Para obtener los datos de este ensayo, se ha decidido tomar datos cada cierto intervalo del ángulo de dirección. Para incremento de ángulo igual a $1,5^\circ/\text{s}$, se tomarán cada $7,5^\circ$ para que el ensayo tenga una duración mínima de 45s. Para incremento de $10^\circ/\text{s}$, lo haremos cada 50° para que así la duración pueda llegar a 40s.

Para ayudar a la recogida de datos, el programa CarSim® cuenta con una herramienta que traspasa los datos utilizados para sí mismo en el dibujo de los gráficas a una hoja de texto. Por lo que queda más sencillo la toma de los datos exactos ya que se tomarán datos de aceleración lateral en cada uno de los incrementos de dirección fijado.

Seguidamente, se va a explicar cómo se deben de interpretar las gráficas de este ensayo. Operando como en la anterior simulación la ecuación del coeficiente de viraje, se tiene:

$$\delta = \frac{L}{R} + K_v \cdot \frac{V^2}{g \cdot R} \Rightarrow \frac{\delta}{\frac{V^2}{g}} = \frac{g \cdot L}{V^2} + K_v \Rightarrow \frac{\partial \delta}{\partial \left(\frac{V^2}{gR} \right)} = \frac{gL}{V^2} + K_v$$

Si ahora se anula K_v (el vehículo se comportaría como neutro), la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \left(\frac{V^2}{gR} \right)} = \frac{gL}{V^2}$$

Es decir, cualquier vehículo que la pendiente de su curva cumpliera $\frac{gL}{V^2}$ se comportaría como neutro mientras si esta curva es superior a ésta, se comportaría como subvirador y si la curva la realiza por debajo de este valor, sería sobrevirador. Por lo que si se representa la recta de esta ecuación, se puede saber el comportamiento del todoterreno, el fin que se intenta lograr.



A continuación se tienen las tablas de este ensayo, primeramente se tendrán las tablas de las distintas velocidades, desde 30 hasta 130 kilómetros por hora, con incremento de ángulo de dirección de 1,5 grados y a continuación las correspondientes al incremento de ángulo de dirección de 10 grados.

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 30KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 1,5°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
$a_y(g)$	$\delta (^{\circ})$	$a_y(g)$	$\delta (^{\circ})$	$a_y(g)$	$\delta (^{\circ})$	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,013	7,5	0,014	7,5	0,017	7,5	4,567
0,026	15	0,028	15	0,031	15	9,254
0,040	22,5	0,042	22,5	0,046	22,5	13,954
0,054	30	0,057	30	0,062	30	18,929
0,068	37,5	0,073	37,5	0,080	37,5	23,830
0,081	45	0,090	45	0,093	45	28,613
0,095	52,5	0,103	52,5	0,106	52,5	33,246
0,106	60	0,115	60	0,117	60	37,142
0,114	67,5	0,126	67,5	0,130	67,5	40,241

Tabla 9: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 50KM/H H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 1,5°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
$a_y(g)$	$\delta (^{\circ})$	$a_y(g)$	$\delta (^{\circ})$	$a_y(g)$	$\delta (^{\circ})$	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,034	7,5	0,037	7,5	0,044	7,5	4,275
0,068	15	0,073	15	0,082	15	8,661
0,103	22,5	0,110	22,5	0,120	22,5	13,061
0,140	30	0,148	30	0,160	30	17,718
0,176	37,5	0,190	37,5	0,208	37,5	22,305
0,211	45	0,235	45	0,243	45	26,782
0,246	52,5	0,269	52,5	0,275	52,5	31,119
0,275	60	0,300	60	0,305	60	34,765
0,297	67,5	0,328	67,5	0,338	67,5	37,666

Tabla 10: Ensayo velocidad constante 50km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°



ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 70KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 1,5°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
a _y (g)	δ (°)	a _y (g)	δ (°)	a _y (g)	δ (°)	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,052	7,5	0,057	7,5	0,067	7,5	3,356
0,105	15	0,113	15	0,125	15	6,799
0,159	22,5	0,169	22,5	0,184	22,5	10,252
0,215	30	0,228	30	0,247	30	13,908
0,271	37,5	0,293	37,5	0,320	37,5	17,509
0,325	45	0,361	45	0,374	45	21,023
0,378	52,5	0,413	52,5	0,423	52,5	24,427
0,422	60	0,461	60	0,469	60	27,290
0,458	67,5	0,504	67,5	0,521	67,5	29,566

Tabla 11: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 90KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 1,5°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
a _y (g)	δ (°)	a _y (g)	δ (°)	a _y (g)	δ (°)	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,070	7,5	0,077	7,5	0,091	7,5	2,740
0,142	15	0,152	15	0,169	15	5,552
0,214	22,5	0,229	22,5	0,249	22,5	8,371
0,291	30	0,307	30	0,333	30	11,357
0,366	37,5	0,395	37,5	0,432	37,5	14,297
0,439	45	0,487	45	0,505	45	17,166
0,510	52,5	0,558	52,5	0,570	52,5	19,946
0,570	60	0,622	60	0,633	60	22,284
0,618	67,5	0,681	67,5			24,143

Tabla 12: Ensayo velocidad constante 90km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°



ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 110KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 1,5°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	Kv=0	δ (°)	$a_y(g)$	
0,000	0	0,000	0		0	0,000
0,074	7,5	0,083	7,5	0,100	7,5	0,074
0,149	15	0,166	15	0,189	15	0,149
0,231	22,5	0,255	22,5	0,298	22,5	0,231
0,310	30	0,361	30	0,376	30	0,310
0,383	37,5	0,434	37,5	0,440	37,5	0,383
0,437	45	0,493	45	0,510	45	0,437
0,480	52,5	0,545	52,5	0,590	52,5	0,480
0,512	60	0,586	60			0,512
0,540	67,5	0,629	67,5			0,540

Tabla 13: Ensayo velocidad constante 110km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 130KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 1,5°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
δ (°)	$a_y(g)$	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	$a_y(g)$	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,081	7,5	0,093	7,5	0,112	7,5	1,524
0,164	15	0,186	15	0,215	15	3,079
0,255	22,5	0,294	22,5	0,331	22,5	4,775
0,340	30	0,394	30	0,405	30	6,365
0,412	37,5	0,464	37,5	0,473	37,5	7,711
0,462	45	0,523	45	0,557	45	8,658
0,499	52,5	0,570	52,5			9,352
0,528	60	0,619	60			9,897
0,557	67,5	0,654	67,5			10,437

Tabla 14: Ensayo velocidad constante 130km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 30KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 10°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,115	50	0,116	50	0,118	50	40,304
0,230	100	0,231	100	0,233	100	80,958
0,344	150	0,351	150	0,351	150	121,131
0,448	200	0,461	200	0,459	200	157,697
0,535	250	0,561	250	0,560	250	188,307
0,610	300	0,642	300	0,642	300	214,672
0,667	350	0,681	350	0,671	350	234,585
0,689	400	0,682	400	0,666	400	242,317

Tabla 15: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 10°

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 50KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 10°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,228	50	0,253	50	0,263	50	28,917
0,371	100	0,421	100	0,444	100	46,966
0,448	150	0,493	150	0,542	150	56,768
0,499	200	0,548	200			63,125
0,549	250					69,492

Tabla 16: Ensayo velocidad constante 50km/h e incremento de ángulo de dirección 10°

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 70KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 10°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,351	50	0,386	50	0,412	50	22,699
0,571	100	0,652	100	0,685	100	36,867
0,690	150					44,561

Tabla 17: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 10°



ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 90KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 10°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	δ (°)	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,474	50	0,526	50	0,546	50	18,535
0,770	100	0,874	100			30,104
0,931	150					36,387

Tabla 18: Ensayo velocidad constante 90km/h e incremento de ángulo de dirección 10°

ENSAYO PARA VELOCIDAD CONSTANTE 110KM/H E INCREMENTO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN 10°						
Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°		Kv=0
$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	$a_y(g)$	δ (°)	$a_y(g)$	
0,000	0	0,000	0	0,000	0	0
0,468	50	0,532	50	0,562	50	12,243
0,663	100					17,344

Tabla 19: Ensayo velocidad constante 110km/h e incremento de ángulo de dirección 10°

A la hora de analizar los resultados, lo primeramente reseñable es que no se pueden obtener las tablas completas para los ensayos de incremento de 10°/s, para altas velocidades de 70km/h y 110km/h y para los tres grados de divergencia. Esto significa que el Nissan Pathfinder no puede seguir la trayectoria marcada y comienzan los efectos de deslizamiento severo.

También se pueden ver estos efectos para incremento de ángulo de 1,5°/s y para convergencia de 4°, aunque siendo menores los efectos que para el anterior incremento.

Como el incremento de ángulo que se aplica al volante, determina que en gran medida el desarrollo de los ensayos, se va a estudiar por separado los resultados obtenidos para cada grupo de incremento de ángulo.

Primeramente, se verán representados los gráficos para velocidades desde 30 hasta 130 kilómetros horas con incremento de ángulo de dirección de 1,5° por segundo.

Para ayudar con el análisis de las curvas, se ha añadido una nueva curva en color verde llamada Kv=0, que da detalle de cómo se comportaría un vehículo neutro en esas condiciones de

forma teórica. De esa manera, se verá de mejor manera por comparación de pendiente, como se comporta el vehículo en cada una de las situaciones.

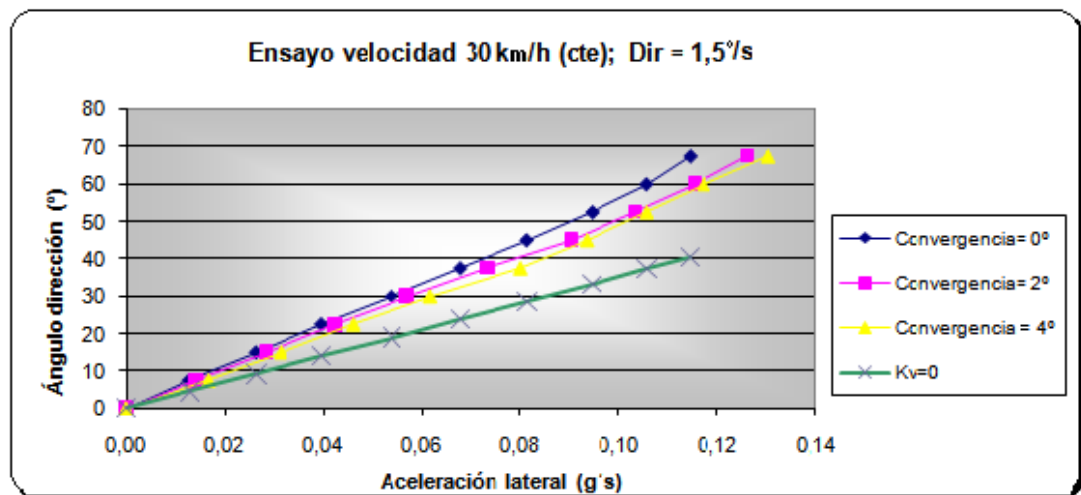


Figura 51: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°/s

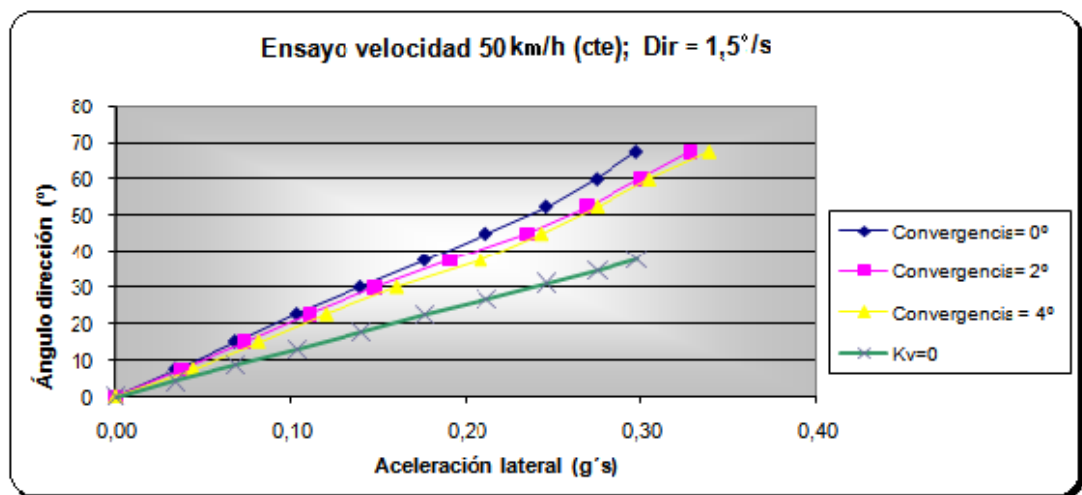


Figura 52: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°/s

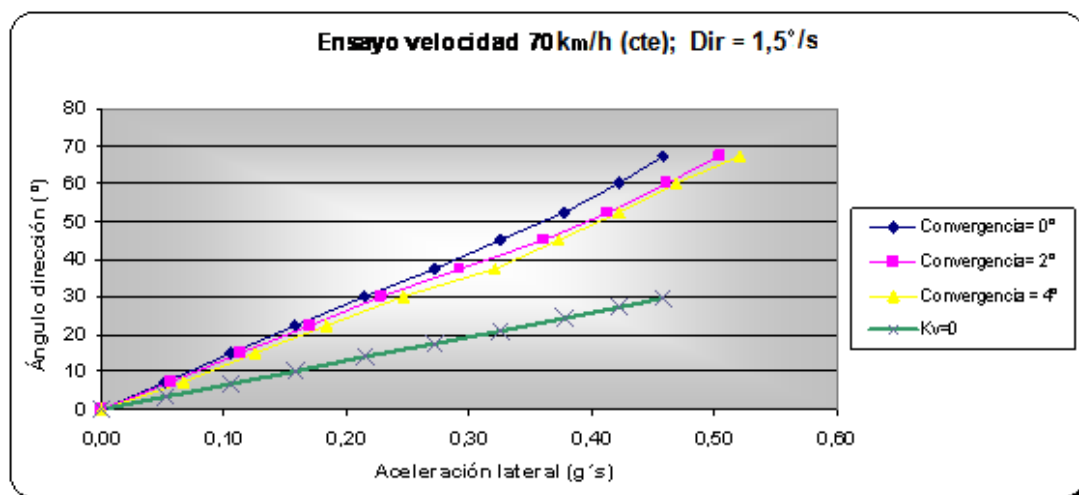


Figura 53: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°/s

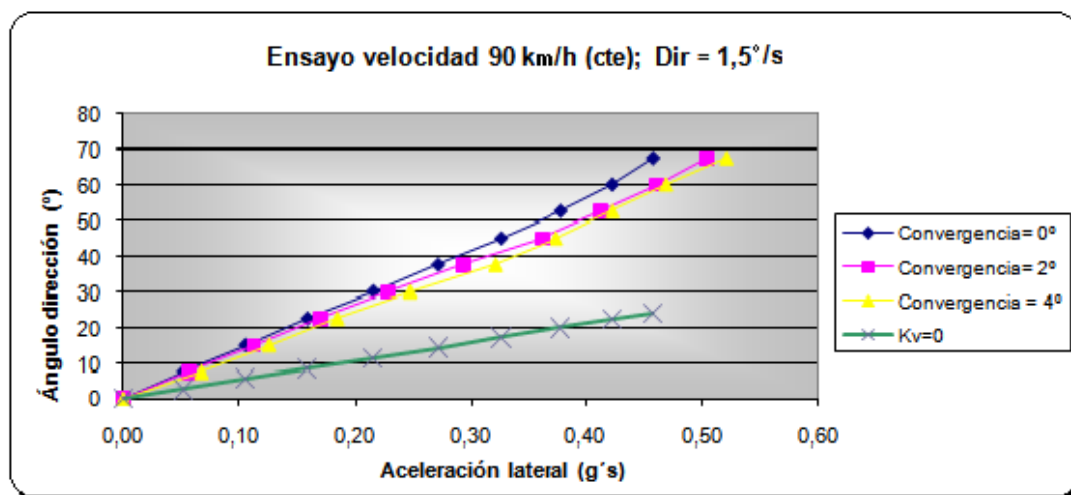


Figura 54: Ensayo velocidad constante 90km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°/s

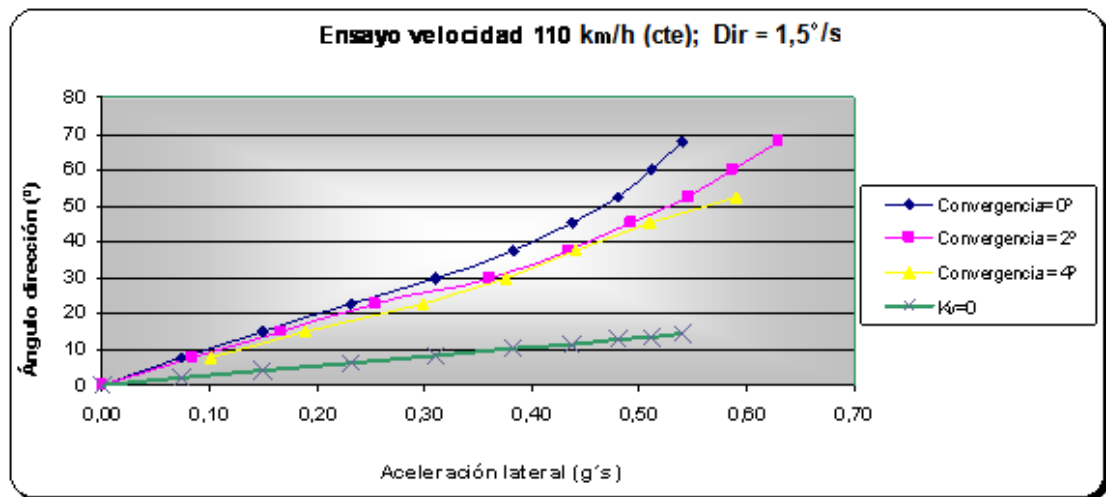


Figura 55: Ensayo velocidad constante 110km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°/s

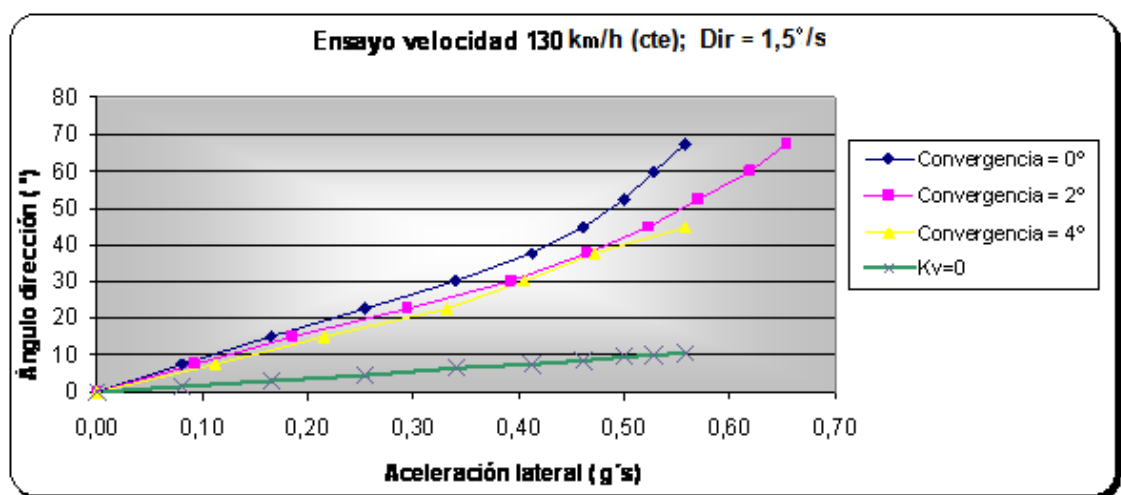


Figura 56: Ensayo velocidad constante 130km/h e incremento de ángulo de dirección 1,5°/s

En estas primeras gráficas se puede ver un comportamiento común en todas ellas: las curvas representadas siempre se muestran por encima de la curva del comportamiento neutro ($K_v=0$), es decir, el vehículo revela de entrada un carácter subvirador en todas las pruebas. En este segundo ensayo se sigue confirmando lo sucedido en el anterior, pues se sigue trabajando con un vehículo subvirador, un vehículo que con los valores fijados de fábrica, ayuda al conductor a trazar las curvas con mayor seguridad.



Otro aspecto al que se debe prestar atención es al comportamiento que muestran muchas de las gráficas en su tramo final. Como se puede apreciar, en los últimos tramos de las curvas las pendientes se acentúan de mayor manera.

Trasladando el significado al comportamiento real vehicular, viene a indicar que a partir de este punto, los efectos de deslizamiento y de inestabilidad comienzan a sucederse y el control sobre el vehículo comienza a perderse. De hecho, a partir de ese punto en la curva donde la pendiente se incrementa, la mayoría de los ensayos cesan, pues se llega a ese punto que se vio anteriormente en las curvas obtenidas del CarSim®, donde la curva deja de crecer y cae hasta cero, donde se ha llegado al punto donde el control vehicular deja de estar en las manos del conductor.

El siguiente aspecto a renombrar es lo que sucede en los ensayos para bajas aceleraciones laterales. En todas las gráficas podemos ver como el grado de convergencia que hemos asignado a cada uno de los ensayos, hace que no varía la respuesta direccional entre un grado u otro. Eso sí, cuando el vehículo va alcanzado una mayor aceleración, las tres curvas comienzan a separarse y es cuando se puede observar los diferentes comportamientos con los diferentes ángulos de convergencia.

Analizando con detalle las curvas de grados de divergencia 0°, se puede observar que son estas curvas las que, llegado a un punto de mas aceleración lateral, son las que mas pendiente presentan y por tanto, las curvas que antes podrían pasar a presentar un carácter sobrevirador.

Si ahora se analizan las curvas de 2 y 4 grados, se ve que muestran prácticamente el mismo comportamiento y en muchos de los ensayos son coincidentes o paralelas con mínima distancia entre ellas. Sin embargo, las curvas de grado de divergencia igual a 4°, son las que, a altas aceleraciones laterales, llegan a fin de ensayo con anterioridad, mostrando que ya no es posible proseguirlo por los efectos de deslizamiento producidos y pérdida de control.

Seguidamente, se verán representados los gráficos para velocidades desde 30 hasta 110 kilómetros horas con incremento de ángulo de dirección de 10°. Se recuerda, que la gráfica de 130 kilómetros por hora, no se ha podido realizar ya que, como se vio en las primeras tablas, los efectos de deslizamiento comienzan a actuar desde el principio del ensayo y no es posible la obtención de datos para ejecutar las representaciones gráficas. Igualmente, las graficas de ensayos de 70, 90 y 110 kilómetros por hora se encuentran disminuidas en datos.

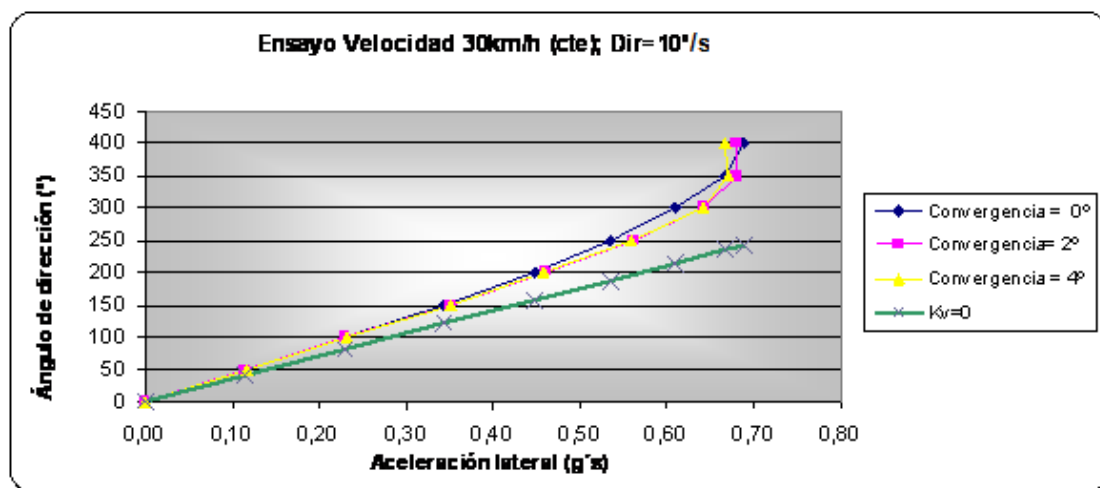


Figura 57: Ensayo velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección 10°/s

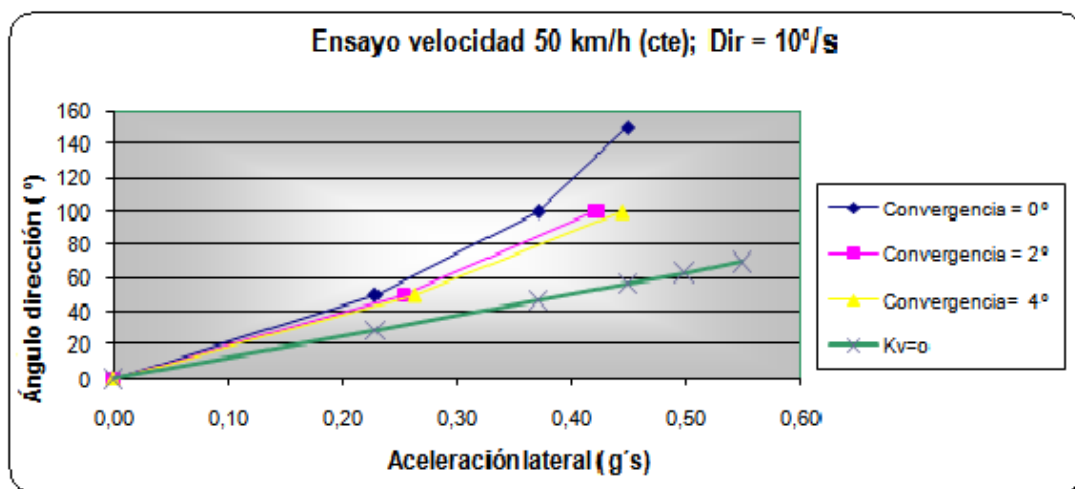


Figura 58: Ensayo velocidad constante 50km/h e incremento de ángulo de dirección 10°/s

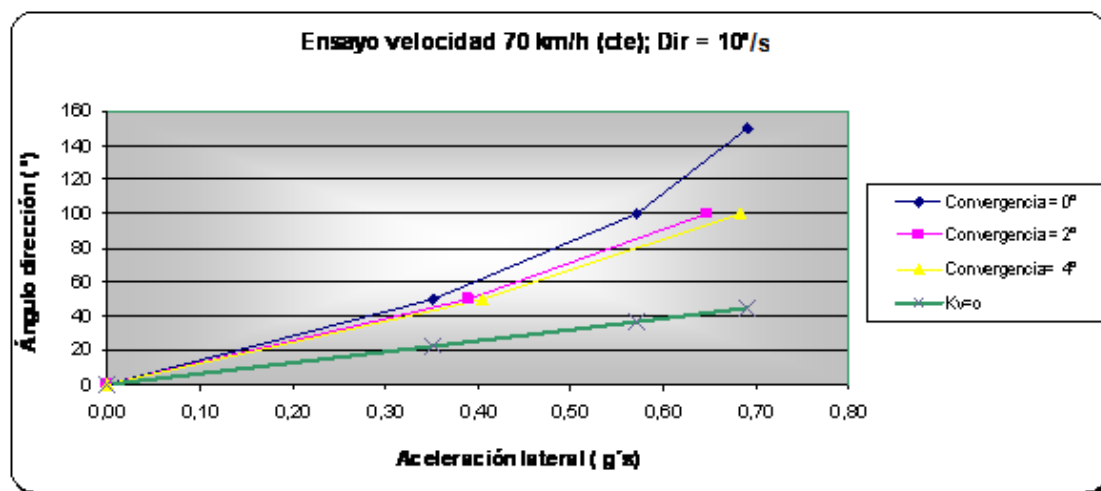


Figura 59: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 10°/s

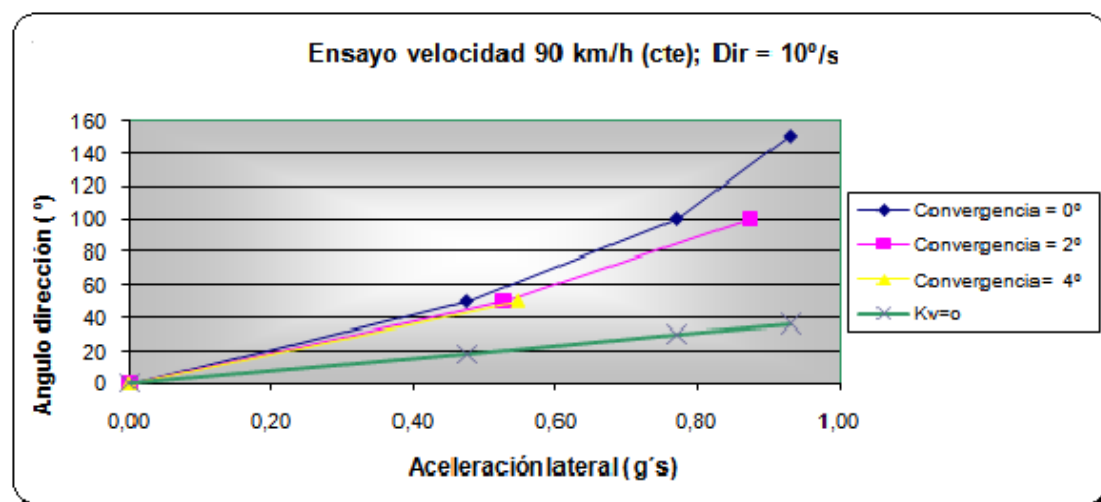


Figura 60: Ensayo velocidad constante 90km/h e incremento de ángulo de dirección 10°/s

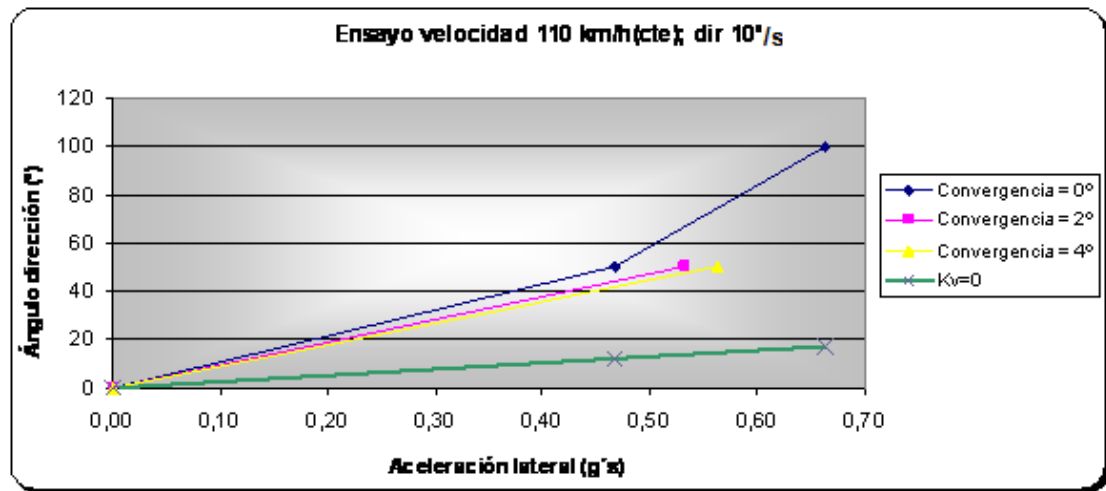


Figura 61: Ensayo velocidad constante 70km/h e incremento de ángulo de dirección 10°/s

La combinación de velocidad, divergencia e incremento de ángulo de dirección, hacen que en este segundo grupo de ensayos, los resultados obtenidos sean muy limitados. Tan sólo se ha podido completar la toma de datos completamente a muy bajas velocidades (30Km/h), el resto de curvas quedan acortadas en datos.

En este grupo de ensayos, se pueden ver muchos de los efectos producidos en el primer grupo, como que el peor comportamiento de grado de divergencia es el de 4°. Se puede ver que es el ángulo con el que la pérdida de control se produce antes. También se puede observar que entre el ángulo de 0° y el de 2°, las curvas de ángulo 0° son las que más pendiente tienen y por tanto, son las que muestran un carácter subvirador más acusado, lo que puede llevar a que al final, el control vehicular se complique. Por lo que si se debiera elegir a uno de los tres ángulos ensayados, se preferiría en el que tiene un comportamiento más lineal, en el caso estudiado, el grado de divergencia igual a 2°.

Como se ha comentado, este segundo grupo de ensayo tiene un comportamiento muy parecido al primero en la mayoría de los ensayos, pero sin embargo, en la primera curva, la curva correspondiente a 30Km/h, se puede ver al final de la misma un comportamiento completamente diferente al esperado.

Al incorporar un ángulo de convergencia a los neumáticos, lo que se pretende es que la conducción en curva sea más fácil y cómoda, pues se intenta compensar la apertura – cierre (en el caso de estudio, el cierre) que sufren los neumáticos al realizar la curva. Este comportamiento se puede observar en los ensayos pues la pendiente de la curva es positiva. No obstante, al final de la curva de la que se está hablando (velocidad constante 30km/h e incremento de ángulo de dirección



10°/s), se puede observar que la pendiente se vuelve negativa. Es decir, se está frente a un cambio de comportamiento direccional, se está hablando en ese instante de un carácter sobrevirador. Este carácter significa que a la hora de conducción en curva, el conductor, tendría que girar el volante en sentido contrario al de la curva para trazarla. Por lo que resulta un comportamiento completamente indeseable.

Afortunadamente, esta situación de cambio de comportamiento direccional no se da en todos los grados. Tan sólo es observable claramente en el ángulo de convergencia de 4° y muy ligeramente en el ángulo de 2°. El ángulo de 0° se sigue comportando con carácter subvirador.

En la práctica, si se conduce un vehículo con las mismas condiciones que las que tiene el ensayo, se tendría que llegar a un punto muy extremo para pasar a tener este comportamiento direccional: se tendría que circular en curva, realizando incremento de ángulo de 10 grados y realizarlo durante un tiempo de 40 segundos. Algo bastante inviable en las carreteras, por lo que no debe preocupar que en unas condiciones muy concretas, el comportamiento direccional cambie, pues sólo representa un caso muy concreto de todos los casos reales, donde el modelo estudiado con las condiciones implementadas, sí se comportar de forma deseable.

5.4 ENSAYO DE ÁNGULO DE DIRECCIÓN CONSTANTE

En este ensayo lo que se pretende hacer es que durante el ensayo, el vehículo realice la curva bajo un ángulo de dirección constante y a diferentes velocidades (a diferencia del anterior, donde se trabaja a velocidad constante y ángulo de dirección variable).

En este ensayo lo que se quiere representar es la inversa del radio de la curva en el eje de ordenadas frente a la aceleración lateral en el eje de abscisas, de forma que se obtenga, como en los casos anteriores el coeficiente de viraje como la pendiente de la curva.

Se desarrollará de nuevo la ecuación del coeficiente de viraje quedando así:

$$\delta = \frac{L}{R} + K_v \cdot \frac{V^2}{g \cdot R} \Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{\delta}{L} - \frac{K_v}{R} \cdot \frac{V^2}{gL} \Rightarrow \frac{\partial 1/R}{\partial V^2 / g \cdot R} = -\frac{K_v}{L} \Rightarrow \frac{\partial 1/R}{\partial a_y} = -\frac{K_v}{L}$$

Por lo que como se ve, al representar la inversa del radio frente a la aceleración lateral se obtiene una curva cuya pendiente es la inversa del coeficiente de viraje dividido por una constante. Es decir que dicha curva indicará el comportamiento del vehículo que se está estudiando de forma que cuando su pendiente sea negativa, éste se estará comportando como subvirador, cuando sea nula será neutro y cuando sea positiva sobrevirador.

Las simulaciones que se han llevado a cabo están representadas en la siguiente tabla a modo de resumen.

ENSAYO PARA ÁNGULO DE DIRECCIÓN CONSTANTE		
$\delta = 30^\circ$	$\delta = 100^\circ$	$\delta = 180^\circ$
v=30 km/h	v=30 km/h	v=30 km/h
v=50 km/h	v=50 km/h	v=50 km/h
v=70 km/h	v=70 km/h	v=70 km/h
v=90 km/h	v=90 km/h	v=90 km/h
v=110 km/h	v=110 km/h	v=110 km/h
v=130 km/h	v=130 km/h	v=130 km/h

Tabla 20: Tabla: Simulaciones realizadas para ensayo de dirección constante

5.4.1 Parámetros de la simulación

En este caso, el único parámetro que habrá que cambiar en CarSim® a la hora de definir la simulación respecto al primer ensayo, será la condición de guiado.

Mientras que en el primer ensayo (ensayo de radio constante) se le imponía al vehículo una trayectoria a seguir, en este, se le fija un ángulo de dirección, por lo tanto lo único que habrá que hacer será cambiar esta condición en la pantalla principal de CarSim®, siendo el resto de parámetros válidos para el ensayo.

5.4.2 Análisis de los resultados obtenidos

En este ensayo para obtener los resultados requeridos, al igual que sucedía con el primero, se obtendrá un valor de aceleración lateral para cada una de las simulaciones, cuando ésta se haya estabilizado. Para obtener la inversa del radio, se utilizará la aceleración lateral en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R} = \frac{a_y}{V^2}$$

A continuación se tienen las tablas de resultados obtenidos para cada uno de los ensayos llevados a cabo.

ENSAYO ÁNGULO DE DIRECCIÓN CONSTANTE 30°						
	Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°	
	$a_y(g)$	1/R(m)	$a_y(g)$	1/R(m)	$a_y(g)$	1/R(m)
V=30Km/h	0,0515	0,0073	0,0517	0,0073	0,0416	0,0059
V=50Km/h	0,1235	0,0063	0,1301	0,0066	0,1108	0,0061
V=70Km/h	0,1754	0,0046	0,1888	0,0049	0,1851	0,0048
V=90Km/h	0,2131	0,0033	0,2338	0,0037	0,2330	0,0037
V=110Km/h	0,2317	0,0024	0,2574	0,0027	0,2686	0,0028
V=130Km/h	0,2567	0,0019	0,2890	0,0022	0,2813	0,0021

Tabla 21: Ensayo ángulo de dirección constante 30°

ENSAYO ÁNGULO DE DIRECCIÓN CONSTANTE 100°						
	Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°	
	$a_y(g)$	1/R(m)	$a_y(g)$	1/R(m)	$a_y(g)$	1/R(m)
V=30Km/h	0,1683	0,0238	0,1650	0,0233	0,1349	0,0191
V=50Km/h	0,3829	0,0195	0,3738	0,0190	0,3716	0,0189
V=70Km/h	0,5015	0,0130	0,5305	0,0138	0,5168	0,0134
V=90Km/h	0,5478	0,0086	0,5946	0,0093	0,5999	0,0094
V=110Km/h	0,5790	0,0061	0,6314	0,0066	0,6712	0,0071
V=130Km/h	0,5872	0,0044	0,6523	0,0049		

Tabla 22: Ensayo ángulo de dirección constante 100°

ENSAYO ÁNGULO DE DIRECCIÓN CONSTANTE 180°						
	Convergencia=0°		Convergencia=2°		Convergencia=4°	
	$a_y(g)$	1/R(m)	$a_y(g)$	1/R(m)	$a_y(g)$	1/R(m)
V=30Km/h	0,2966	0,0419	0,2878	0,0407	0,2458	0,0347
V=50Km/h	0,5313	0,0270	0,6135	0,0312	0,6084	0,0309
V=70Km/h	0,6514	0,0169	0,7643	0,0198	0,7752	0,0201

Tabla 23: Ensayo ángulo de dirección constante 180°

En este tercer ensayo se lleva de nuevo al vehículo hasta límites extremos y tampoco es posible disponer de las tablas al completo. El concreto, para el ensayo de ángulo de dirección igual a 180°, no es imposible encontrar datos para una velocidad mayor de 70km/h, ya que comienzan de nuevo los posibles efectos de deslizamiento.

Así mismo, también es observable en las tablas que las columnas con ángulo de convergencia igual a 4, son las primeras que comienzan a perder datos. Esto ya puede dar que pensar sobre la estabilidad que aporta a la hora de conducir este ángulo, ya que en iguales condiciones respecto al resto de ángulos, es con el único que no se puede realizar algunos tramos de las pruebas.

Se pasa a continuación al estudio mediante curvas, donde analizando la pendiente de cada una ellas, se podrá saber el comportamiento direccional del todoterreno.

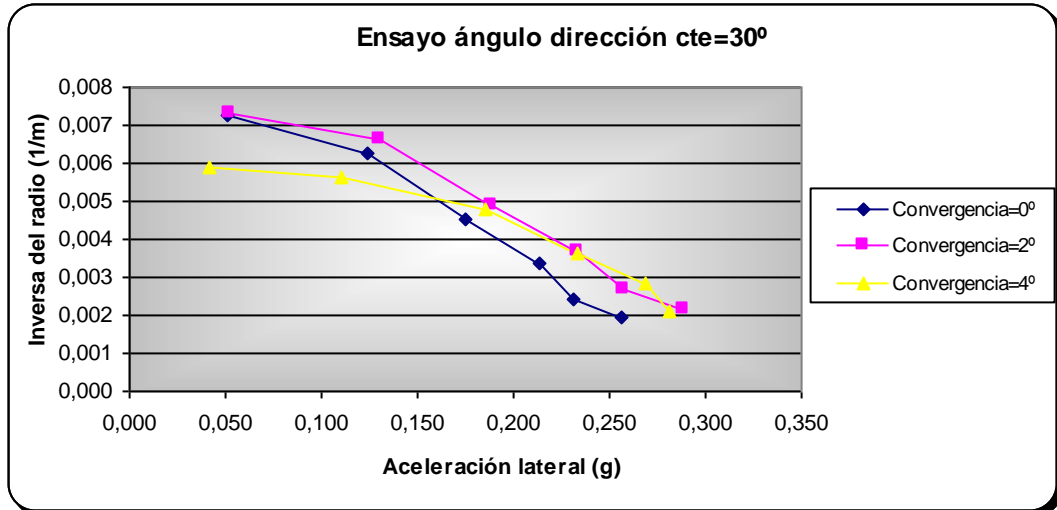


Figura 62: Ensayo ángulo de dirección constante 30°

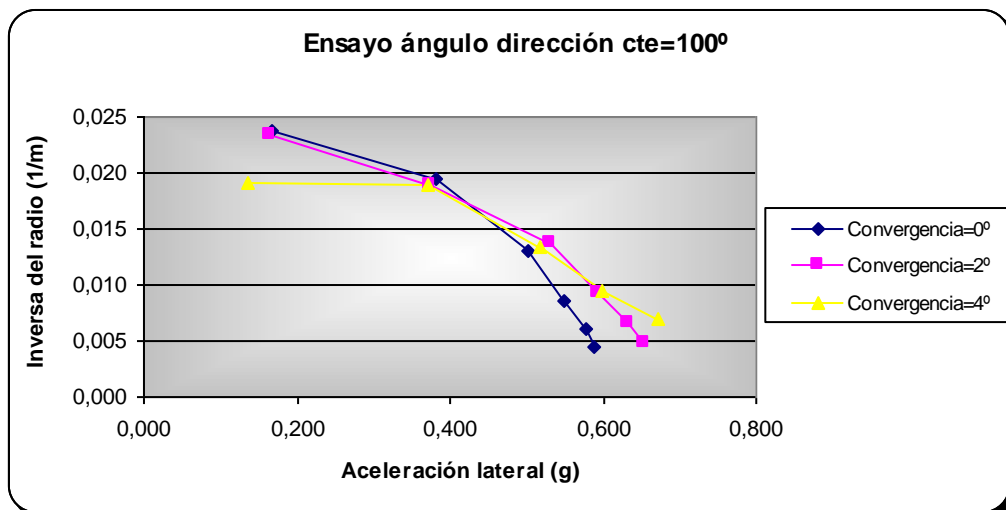


Figura 63: Ensayo ángulo de dirección constante 100°

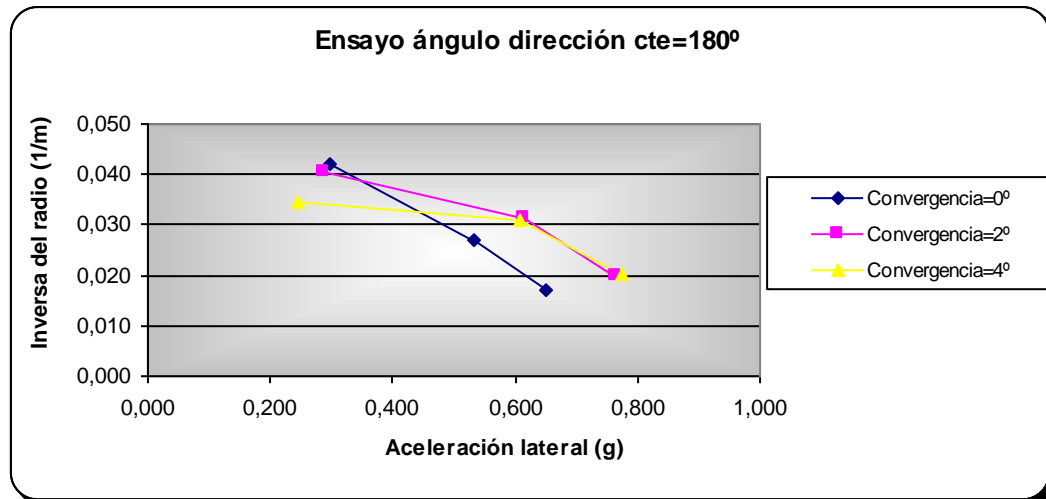


Figura 64: Ensayo ángulo de dirección constante 180°

Para el correcto análisis de las curvas, se recuerda que a diferencia de lo que sucedía con el segundo ensayo, aquí se busca una pendiente negativa que lleve a decir que el comportamiento del vehículo es subvirador.

Observando las curvas se corrobora que en todas ellas, el comportamiento direccional del vehículo es subvirador, pues son rectas con pendientes negativas. Que como ya se ha comentado varias veces a lo largo del estudio, es el comportamiento más deseable a la hora de conducir, ya que de esta manera, el conductor es capaz de trazar las curvas con mayor facilidad.

Si ahora se realiza el estudio de las curvas para ángulo de 30°, 100° y 180°, se puede apreciar que el trío de curvas tienen comportamientos muy similares en todos los ángulos de divergencia.

Si se presta atención a las curvas de 0° y 2°, se puede observar que ambas curvas permanecen casi de forma paralela (teniendo presente que todas las curvas parten desde 0 y en ese punto no cabe el paralelismo entre las curvas), es decir, muestran prácticamente el mismo comportamiento.

Otro aspecto común a las tres curvas es la variación que sufre la curva de divergencia grado 4. Primeramente, se presenta siempre como la curva de mas carácter subvirador de las presentes, y según avanza el ensayo, se va convirtiendo en la que menos. Esto es algo completamente indeseable, ya que significa su comportamiento subvirador, dependerá de la aceleración lateral a la que esté sometida, es decir, a efectos prácticos, a la velocidad a la que se circule.



De forma general se puede concluir de este ensayo los siguientes puntos.

El peor comportamiento que se puede encontrar en el vehículo es cuando se le dota con ángulo de convergencia igual a 4° . Pues como se ha comentado, el comportamiento varía con la velocidad del vehículo, por lo que el conductor estaría en un estado de inseguridad, ya que él no es capaz de controlar al cien por cien el vehículo.

Por el contrario, si se dota el vehículo con ángulos de convergencia de 0° o de 2° , se tendría un comportamiento subvirador a lo largo de todo el ensayo. En este caso, no dependería si se está a menos o mas velocidad, lo que es totalmente un comportamiento deseable.

En este tercer ensayo sólo se puede descartar como ángulo menos favorecedor el de 4° , tanto el ángulo de 0° y de 2° serian ángulos con buen comportamiento direccional.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS: [APA95], [CQS05], [CMR05] y [SAV91]



6 CONCLUSIONES

Una vez se han realizado todos los ensayos, se pasa a enumerar las principales conclusiones que se han obtenido:

- El vehículo estudiado presenta un carácter subvirador desde el comienzo de los ensayos y durante todo el proceso de estudio, y este carácter no se ve modificado por la variación de los ángulos de dirección.

Es reseñable, que en el proceso de realización de los ensayos, y según se va elevando las velocidades y aceleraciones, se puede observar como el carácter subvirador, primeramente observado, se va acentuando.

Solamente hay un punto de un ensayo concreto donde el carácter del vehículo es sobrevirador. Ese punto donde el carácter vehicular es completamente indeseable es en el ensayo de velocidad constante, velocidad 30Km/h e incremento de ángulo de dirección de 10 grados por segundo. Se está hablando que de los 54 ensayos realizados, sólo en uno de ellos el comportamiento direccional es contrario al esperado. Y como se recuerda, no sucedía en todos los grados de divergencia, sólo en el de 4° y muy ligeramente en el de 2°.

- Respecto al ángulo de convergencia de 0° se puede obtener la siguiente conclusión una vez realizados los ensayos. El vehículo da muestras de comportamiento ligeramente subvirador, pero no demasiado excesivo, por lo que en principio, podría ser un ángulo de convergencia utilizado por los fabricantes de automóviles para incorporarlo.
- Analizando el ángulo de 2° se puede observar que se comporta de una manera similar al ángulo de 0° en bajas velocidades, pero si ahora se habla de lo sucedido a altas velocidades, se puede observar que el ángulo de 2° demuestra un comportamiento bastante más lineal que el ángulo de 0°. Lo que ayudará a estar prevenidos a la hora de la conducción en curva en velocidades altas.



- Y por último se comentará el comportamiento que presenta el tercer ángulo de convergencia, el ángulo de 4° . Este ángulo es el que más problemas presenta, en referencia a los otros dos ángulos estudiados y es con diferencia donde los efectos de deslizamiento del vehículo tardan menor tiempo en aparecer. En comparación con los ángulos anteriores, en un mismo ensayo y para idénticas condiciones, siempre aparecerán los efectos de deslizamiento en primer lugar, en un vehículo todoterreno dotado del ángulo de divergencia 4° , antes que en los dotados de 2° o 0° .

Analizado los comportamientos por separado de los tres ángulos estudiados, se pasará a reflexionar con que ángulo se podría dotar a un vehículo como el ensayado en la vida real.

Como se ha podido observar, el ángulo que muestra mejores condiciones tanto a bajas velocidades como a altas, es el ángulo de 2° .

Este ángulo, se comportaba a bajas velocidades de forma similar que el ángulo de 0° y ligeramente mejor que en el de 4° .

Y frente a altas velocidades, era más lineal que el ángulo de 0° y mucho más estable que el ángulo de 4° .

Por lo que en la vida real, al vehículo se le dotaría con un ángulo entre 0° y 2° , más cercano a este último. Hecho que ocurre con la mayoría de los fabricantes, donde los automóviles salen de fábrica con un ángulo de convergencia de entre 0° y 1° . En concreto, el todoterreno estudiado salía de fábrica con un ángulo de convergencia en los neumáticos traseros de 0.54°

Lo que se debe evitar siempre, es realizar vehículos con grados de convergencia mayor de 2° , como por ejemplo 4° . Ya que a no muy altas velocidades, 70km/h, y dependiendo del radio de curvatura de la trayectoria, se pueden encontrar con efectos indeseables de deslizamiento y con pérdida de control del automóvil irreversibles.

Y para finalizar, se pasará a recordar nuestros objetivos que se marcaron en el primer capítulo con el fin de ver si éstos han sido logrados o no:



- Evaluación del comportamiento virador de un vehículo todoterreno → El vehículo se comporta con carácter subvirador en todos los ensayos, excepto en un punto de un ensayo (ensayo velocidad constante), donde tenía carácter sobrevirador.
- Comprobación del ángulo de convergencia más satisfactorio para cada uno de los ensayos de caracterización → Para los tres ensayos el ángulo más satisfactorio es el de 2°.
- Obtención del ángulo de convergencia más adecuado para el vehículo analizado → El ángulo con el que se debería dotar al vehículo estaría entre 0 y 2, siendo más cercano a este último.



7 DESARROLLOS FUTUROS

Como se ha podido ir viendo a lo largo de este documento, el proyecto está basado en la realización de unas ciertas simulaciones por parte de un software. Por lo que el inmediato y más deseable desarrollo futuro, sería poder realizar los tres ensayos, radio constante, velocidad constante y ángulo de dirección constante con un vehículo real.

Para conseguir que el ensayo con un vehículo real sea llevado a cabo y que sea un símil del ensayo descrito en este documento, el vehículo en cuestión debe de tener las mismas características que el aquí descrito, tanto de medidas como de peso.

Igualmente, se tendría que dotar al vehículo de sensores en las ruedas para que puedan transmitir cuales son las aceleraciones a las que están siendo sometidos los neumáticos y de esta manera poder analizar los resultados.

Además, no solo se necesita de un vehículo idéntico, sino que se debería de contar con un circuito cerrado para poder realizar todos los ensayos como los aquí descritos.

De esta forma, y solo si se cumplen todos estos factores, se podría ver la compatibilidad del ensayo real con el simulado.

Otro desarrollo futuro que se podría plantear es el de realizar los mismos tres ensayos que se ha cometido durante este proyecto, pero con otros vehículos todoterreno de dimensiones mayores o de dimensiones menores. Seguidamente se podría ampliar a la realización de las pruebas con los vehículos reales. De esta manera, se podría tener un estudio del ángulo de divergencia para vehículos todoterrenos con un gran abanico de dimensiones y poder hacer una comparativa entre ellos.

Otra mejora que podríamos tener en cuenta de forma secundaria, es la realización de estos mismos ensayos con otros tipos de vehículos.

El software, además de la versión utilizada durante el desarrollo de este proyecto, tienes más versiones. En concreto, se puede encontrar la versión BikeSim[®] (correspondiente a poder realizar simulaciones con motocicletas y scooters) y TruckSim[®] (versión que nos permite realizar ensayos con camiones de múltiples ejes y trailers).



Con este ensayo, se ha podido estudiar que ángulo de convergencia sería el más correcto de aplicar para un vehículo con las características descritas; sería de gran interés también, ver que sucede con otros tipos de vehículos, como un vehículo de menores dimensiones o incluso una motocicleta o un camión.

De esta manera poder estudiar, si el ángulo de dirección con el que son dotados los vehículos cuando salen de fábrica es uniforme y el mismo para todos o si por el contrario, varía dependiendo de las dimensiones y de las características de cada uno de los vehículos.

Además, si estas simulaciones son realizadas con el mismo software, permite tener más certeza de lo que se está realizando, ya que las simulaciones para todos los tipos de vehículos serán realizadas a partir de un mismo software y con el mismo método de análisis numérico.



8 BIBLIOGRAFÍA

- APA95 Aparicio F et al., “Teoría de los vehículos automóviles”, Publicaciones ETSIIM, Madrid 1995.
- ARI05 Arias-Paz, “Manual de automóviles”, 2005, CIE Inveriones Editoriales Dossat 2000
- BAS01 Bastero J M, “Curso de mecánica”, Ed. Universidad de Navarra, 1991
- BAS93 Bastow, D, “Car Suspension and Handling”, 1993, Society of Automotive Engineers, Inc.
- BOT50 Bowden F P & Tabor D, “The friction and lubrication of solids”, Clarendon Press, Oxford, 1950
- BUR97 Burke A M & Olatunbosun O A, “Contact modelling of the tyre/road interface”, 1997, Int. J. of Vehicle Design, vol 18, nº 2 p. 194-202
- CHA79 Charloteaux M, “Suspensión y dirección”, Ed. Marcombo, Barcelona 1979
- CMR05 “CarSim® manual reference”, July 2005, Mechanical Simulation Corporation, V6.03
- CQS05 “CarSim® quick start guide”, July 2005, Mechanical Simulation Corporation, V6
- DAR97 Darnell I & Hulbert G M, “An efficient Three-Dimensional Tire Model for Vehicle Dynamics Simulations”, 1997, Mech. Struct. & Mach., 25 (1), p. 1-19
- DIA01 Díaz V et al., “La placa alineadora: Análisis técnico de su funcionamiento y resultados”, XI Jornadas de Inspección Técnica de Vehículos, Palma de Mallorca 2001



- GIL92 Gillespie T D, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, 1992
- KIE00 Kiencke U & Nielsen L, "Automotive Control Systems", SAE Internacional, 2001, Ed. Springer
- MOO78 Moore D F, "Friction and wear in rubbers and tyres", International rubber conference, Kiev, October 1978
- PAC87 Pacejka H et al., "Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies", SAE paper 870421, 1987
- PAR79 Párraga J, "Automoción", Ediciones del Castillo S A, Madrid 1979
- VID65 Vidal F, "Industrias del caucho", sección "El caucho en la fabricación de neumáticos"

Proyecto Fin de Carrera:

Pablo Álvaro Gutiérrez, Proyecto fin de carrera
"Estudio del comportamiento direccional de un vehículo". Madrid 2007, UC3M

Páginas webs consultadas:

- WWWANF <http://www.anfac.com>
- WWWANI <http://www.aniacam.com>
- WWWCAR <http://www.carsim.com>
- WWWKM7 <http://www.km77.com>
- WWWNIS <http://www.nissan.es>
- WWWMIC <http://www.michelin.es>
- WWWPIR <http://www.es.pirelli.com>